B. Greene

L'UNIVERSO ELEGANTE
Teoria delle stringhe

Prefazione

Parte prima
I limiti della conoscenza
I. Legati da una stringa

Parte seconda
Spazio, tempo e quanti: il dilemma
II. Spazio e tempo nell'occhio di chi guarda
III. Curve e pieghe
IV. Stranezze microscopiche
V. Ci vuole una teoria nuova:
relatività generale contro meccanica quantistica

Parte terza
La sinfonia del cosmo
VI.Nient'altro che musica: le basi della teoria delle superstringhe
VII. Il « super » delle superstringhe
VIII. Dimensioni che l'occhio non vede
IX. Tracce fresche: le prove sperimentali

Parte quarta
La teoria delle stringhe e la costruzione dello spaziotempo
X. La geometria quantica
XI. Lo spazio si strappa
XII. Oltre le stringhe: alla ricerca della M-teoria
XIII. Buchi neri: una nuova prospettiva
XIV. Riflessioni sulla cosmologia

Parte quinta
L'unificazione nel ventunesimo secolo
XV. Il futuro

Glossario dei termini scientifici
Riferimenti bibliografici e suggerimenti per ulteriori letture
Indice analitico

Capitolo Primo

Legati da una stringa

Parlare di una congiura del silenzio sarebbe certo eccessivo; tuttavia per piú di cinquant'anni - anche nel bel mezzo delle piú grandi realizzazioni scientifiche della storia - i fisici sapevano che una nuvola nera si stava addensando all'orizzonte della loro scienza, e non ne volevano parlare. Il problema è presto detto. I pilastri su cui si basano le fondamenta della fisica moderna sono due: la relatività generale di Einstein, che fornisce un quadro teorico di riferimento dell'universo a grande scala (stelle, galassie, ammassi, fino alle immense estensioni dell'intero universo); e la meccanica quantistica, che ci permette di comprendere l'universo alle scale piú piccole (dalle molecole agli atomi, fino alle particelle subatomiche come gli elettroni e i quark). In anni e anni di ricerche, praticamente tutte le previsioni di queste due teorie sono state confermate sperimentalmente, con un grado di precisione impensabile. Ma le stesse teorie portano inesorabilmente a una conclusione preoccupante: nel modo in cui sono oggi formulate, la relatività generale e la meccanica quantistica *non possono essere giuste entrambe*. Le due teorie responsabili del progresso straordinario della fisica nell'ultimo secolo, le teorie che spiegano l'espansione dei cieli e la struttura della materia, sono incompatibili tra loro.

Se questa notizia vi giunge nuova, forse vi chiederete perché non viene divulgata. La risposta è facile. Se si esclude qualche situazione eccezionale, i fisici studiano oggetti che sono piccoli e leggeri (come gli atomi e i loro componenti), oppure grandi e pesanti (come le stelle e le galassie). Questo significa che ci rivolgiamo di volta in volta alla relatività generale *oppure* alla meccanica quantistica, e che possiamo dare uno sguardo furtivo all'altra teoria, ignorando le sue vibranti proteste. Per cinquant'anni si è lavorato così, quasi in uno stato di beata ignoranza.

Ma nell'universo esistono situazioni eccezionali. Nel centro di un buco nero, una massa enorme assume dimensioni minuscole. All'epoca del big bang, l'intero universo è schizzato fuori da un bruscolino microscopico, al cui confronto un granello di sabbia è un colosso. Qui siamo in presenza di oggetti minuscoli e incredibilmente pesanti, e quindi abbiamo bisogno sia della relatività generale sia della meccanica quantistica. Per ragioni che saranno chiare man mano che procederete nella lettura, le equazioni delle due teorie, se combinate, iniziano a tossicchiare e a fare fumo come una vecchia carretta. Detto in modo meno colorito, l'infelice matrimonio delle due teorie fornisce risposte prive di senso a domande scientifiche perfettamente sensate. Anche se avete intenzione di lasciare l'interno dei buchi neri e i primordi dell'universo avvolti nel mistero, non potete non sentire che il conflitto tra relatività generale e meccanica quantistica grida vendetta e che abbiamo bisogno di un livello di comprensione più profondo. O dobbiamo forse concludere che l'universo è scisso, a livello fondamentale, e che sono necessarie delle leggi per gli oggetti grandi e delle altre leggi (incompatibili con le prime) per quelli piccoli?

La teoria delle superstringhe risponde con forza di no. E' una teoria giovane, paragonata ai venerabili monumenti della meccanica quantistica e della relatività generale. Nell'ultimo decennio è stata oggetto di intense ricerche da parte di fisici e matematici in tutto il mondo e sembra che questo nuovo modo di descrivere i costituenti fondamentali della materia risolva il conflitto tra le due grandi teorie. Anzi, c'è di piú: nella teoria delle superstringhe, meccanica quantistica e relatività generale *hanno bisogno l'una dell'altra* per dare un senso al tutto: il loro matrimonio non è solo felice, ma inevitabile.

E le buone notizie non sono finite. La teoria delle superstringhe - o delle stringhe, per brevità - fa compiere un passo da gigante all'unificazione. Einstein passò trent'anni a cercare una teoria unificata della fisica, una teoria che avrebbe dovuto intessere la trama delle forze e l'ordito dei costituenti elementari in un unico arazzo. Invano. Ora, all'alba del nuovo millennio, i sostenitori delle stringhe affermano di aver trovato i fili di questo evanescente tessuto. La nuova teoria è potenzialmente in grado di mostrare che tutti i meravigliosi accidenti dell'universo - dalla danza frenetica dei quark al

maestoso valzer delle stelle binarie, dal fuoco del big bang al lento incedere delle galassie - sono riflessi di un unico, grandioso principio fisico, di una sola equazione fondamentale.

Queste caratteristiche della teoria delle stringhe richiedono un cambiamento drastico di prospettiva sulle nostre idee riguardo allo spazio, al tempo e alla materia. Ci vorrà del tempo prima che si facciano strada nella percezione comune. Ma come sarà presto chiaro, vista in un contesto appropriato la teoria delle stringhe non è che un portato straordinario ma naturale delle scoperte rivoluzionarie della fisica di questo secolo. Come vedremo ora, il conflitto tra relatività generale e meccanica quantistica non è che il terzo di una serie di scontri radicali avvenuti nel Novecento, ognuno dei quali ha portato a una sorprendente revisione del nostro modo di vedere l'universo.

1. I tre conflitti

Il primo conflitto fu sottolineato già alla fine dell'Ottocento e riguarda alcune proprietà sconcertanti della luce. In breve: secondo le leggi newtoniane del moto è possibile raggiungere la velocità di un raggio di luce, secondo le leggi dell'elettromagnetismo di Maxwell ciò è impossibile. Come vedremo nel capitolo II Einstein risolse la faccenda con la teoria della relatività ristretta (o speciale), provocando una vera rivoluzione nel nostro modo di intendere lo spazio e il tempo. Secondo la relatività ristretta, tempo e spazio non sono piú concetti universali, iscritti in eterno nella pietra dell'esperienza universale; invece, dopo il trattamento di Einstein, spazio e tempo sono diventati costruzioni elastiche, le cui forme dipendono dallo stato di moto di chi le esperisce.

La relatività ristretta pose subito le basi per il secondo conflitto. Secondo la teoria, nessun oggetto - anzi, nessun effetto o perturbazione di ogni sorta - può viaggiare piú veloce della luce. Ma, come vedremo nel capitolo III, la teoria newtoniana della gravitazione, assai intuitiva e ben confermata sperimentalmente, parla di forze che si trasmettono *istantaneamente* attraverso vaste estensioni spaziali. Ancora una volta fu Einstein a risolvere il dilemma, nel *1915,* con la nuova concezione della gravità contenuta nella relatività generale. Anche questa teoria capovolge le idee precedenti di spazio e tempo: non solo sono influenzati dallo stato di moto dell'osservatore, ma possono «piegarsi» e «curvarsi» in risposta alla presenza di massa ed energia. Queste distorsioni nella trama dello spazio-tempo, come vedremo, trasmettono la forza di gravità da un punto all'altro. In definitiva, spazio e tempo non possono piú essere immaginati come un palcoscenico inerte su cui si rappresentano gli eventi dell'universo: sono essi stessi attori della commedia.

La storia si ripete: la scoperta della relatività generale risolse un conflitto ma ne portò avanti un altro. Nei primi trent'anni del Novecento, nacque la meccanica quantistica (di cui parleremo nel capitolo IV), come risposta a una serie di scottanti problemi creati dalla fisica ottocentesca applicata al mondo microscopico. E come abbiamo già detto, il terzo conflitto nasce proprio dall'incompatibilità tra quest'ultima teoria e la relatività generale. Come vedremo nel capitolo V, le dolci curvature dello spazio descritto dalla relatività generale fanno a pugni con il frenetico e turbinante mondo microscopico previsto dalla meccanica quantistica. Per un tentativo di soluzione, offerto dalla teoria delle stringhe, bisognerà aspettare la metà degli anni ottanta: è per questo che il terzo conflitto è giustamente detto il problema centrale della fisica moderna. Anche la teoria delle stringhe richiede un drastico cambiamento delle nostre concezioni di spazio e tempo. Ad esempio, quasi tutti danno per scontato che l'universo abbia tre dimensioni spaziali; ma questo non è vero secondo la teoria delle stringhe: ci sono molte piú dimensioni di quelle visibili, dimensioni strettamente arrotolate dentro la trama spaziale dell'universo. La ridefinizione di tempo e spazio è un tema talmente centrale che verrà usato come guida nel corso dell'intero libro: la teoria delle stringhe non è altro che la storia di questi due concetti dai tempi di Einstein.

Per capire la teoria delle stringhe dobbiamo fare un passo indietro ed esporre brevemente ciò che abbiamo imparato nell'ultimo secolo sulla struttura microscopica dell'universo.

2. L'universo microscopico: Cosa sappiamo sulla materia.

Gli antichi Greci ipotizzarono che la materia di cui l'universo è composto fosse costituita di minuscole parti indivisibili, che chiamarono *atomi* («non tagliabili»). Pensavano che la varietà degli oggetti risultasse dalla combinazione di un piccolo numero di parti fondamentali, proprio come la grande quantità delle parole è formata a partire da poche

lettere di un alfabeto. Era un'idea profetica. Oggi, piú di duemila anni dopo, pensiamo che ciò sia ancora vero, anche se l'identità dei costituenti fondamentali è stata rivista piú volte. Nell'Ottocento si scoprì che molte sostanze comuni come l'ossigeno e il carbonio erano formate da unità di base riconoscibili, a cui fu dato il nome di atomi, secondo la tradizione greca. Il nome è rimasto, ma la storia ha mostrato che è inadeguato: gli atomi sono senz'altro «tagliabili». All'inizio degli anni trenta del nostro secolo, grazie al lavoro di J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr e James Chadwick, il familiare modello dell'atomo come piccolo sistema solare era già consolidato: gli atomi non sono i costituenti ultimi, ma sono formati da un nucleo, a sua volta composto da protoni e neutroni, circondato da una nube di elettroni orbitanti.

Per un po' si pensò a protoni, neutroni ed elettroni come ai veri « atomi» dei Greci. Ma nel 1968, i fisici che lavoravano all'acceleratore lineare di Stanford, grazie alle nuove tecnologie a loro disposizione, scoprirono che protoni e neutroni non sono fondamentali: ognuno è formato da tre particelle, dette *quark* (un nome senza senso scovato dal fisico teorico Murray Gell-Mann nelle pagine del *Finnegan's Wake* di Joyce). Gli esperimenti mostrarono che i quark si presentavano in due varietà, battezzate (con meno fantasia) *up* e *down* («su» e «giù» in inglese). Un protone è formato da due quark up e da uno down, un neutrone da due down e un up.

Tutto ciò che vedete in cielo e in terra è formato da una combinazione di elettroni, quark up e quark down. Non ci sono prove dell'esistenza di costituenti ancora piú fondamentali; ma c'è una messe di prove riguardo ad altri ingredienti microscopici dell'universo. A metà degli anni cinquanta, Frederick Reines e Clyde Cowan dimostrarono con certezza l'esistenza di un quarto tipo di particella fondamentale detta *neutrino,* che era già stata prevista teoricamente negli anni trenta da Wolfgang Pauli. I neutrini si sono dimostrati assai difficili da rilevare, perché sono particelle evanescenti che interagiscono raramente con la materia: un neutrino può passare agevolmente attraverso miliardi di chilometri di piombo senza subire alcun effetto. Ciò dovrebbe rassicurarvi, perché proprio in questo momento, mentre leggete, miliardi di neutrini provenienti dal Sole vi stanno attraversando, per poi passare attraverso la Terra nel loro viaggio solitario nel cosmo. Alla fine degli anni trenta, i fisici che studiavano i raggi cosmici scoprirono il *muone,* una particella identica all'elettrone, salvo per la massa 200 volte maggiore. Non c'era proprio nulla nell'ordine del cosmo che richiedesse la presenza del muone: nessun enigma irrisolto, nessuna nicchia da riempire; fu cosí che il premio Nobel Isidor Isaac Rabi salutò la sua scoperta con un freddo «Chi l'ha ordinato, questo? » Eppure era lì, e altri sarebbero arrivati.

Con tecniche sempre piú avanzate, i fisici hanno continuato a far sbattere tra loro pezzi di materia ad energie elevatissime, ricreando per pochi istanti condizioni mai viste nell'universo dai tempi del big bang. Tra le macerie, hanno cercato altri ingredienti fondamentali da aggiungere alla lista. Ecco cosa hanno trovato: quattro altri quark - rispettivamente *charm* («incanto»), *strange* («strano»), *top* («alto») e *bottom* (« basso »), - un altro cugino pesante dell'elettrone detto *tau,* e due particelle simili al neutrino chiamate *neutrino muonico* e *neutrino tau* (per distinguerle dal primo neutrino, ribattezzato *neutrino elettronico).* Sono tutte particelle che si producono alle alte energie e che esistono per pochi istanti: non sono costituenti di nulla che possiamo incontrare nella vita di ogni giorno. Ma la storia non è ancora finita. Tutte queste particelle hanno una corrispondente *antiparticella, cioè* una compagna di massa identica ma con proprietà opposte per quel che riguarda la carica elettrica, e altri tipi di «carica» che vedremo dopo. Ad esempio, l'antiparticella dell'elettrone è *il positrone,* che ha la stessa massa ma carica elettrica + 1 (l'elettrone ha -1). Quando materia e antimateria vengono a contatto, possono annichilarsi e trasformarsi in energia: ecco perché c'è ben poca antimateria in giro nel nostro mondo.

C'è una struttura in tutto questo, mostrata nella tabella 1.1. Le particelle costituenti la materia sono raggruppate in tre famiglie, ognuna delle quali contiene due quark, uno dei cugini dell'elettrone e un neutrino. I tipi corrispondenti nelle varie famiglie hanno le stesse proprietà ma diversa massa, che cresce dalla famiglia 1 alla 3. La bella notizia è che i fisici hanno ormai sondato la materia fino a scale di un miliardesimo di miliardesimo di metro e hanno visto che *tutto ciò* che incontravano - naturale o prodotto artificialmente che fosse - era costituito da qualche combinazione di queste particelle o delle loro corrispondenti nell'antimateria.

Un'occhiata alla tabella 1.1. vi farà senz'altro condividere il disappunto di Rabi per la scoperta del muone. Le famiglie danno un'apparenza di ordine al tutto, ma ci sono troppi perché a cui rispondere. Perché tanti tipi di particelle fondamentali, visto che la stragrande maggioranza degli oggetti sembra essere fatta di elettroni, quark up e quark down? Perché tre famiglie e non una o quattro? Perché le masse sembrano distribuite casualmente: ad esempio perché il tau pesa 3.518 volte l'elettrone, e il quark top 40.212 volte quello up ? Sembrano numeri senza senso. Sono casuali, sono cosí per volere divino, o forse c'è una spiegazione scientifica comprensibile di queste caratteristiche fondamentali

dell'universo?

Tabella 1. 1.

Le tre famiglie di particelle fondamentali e le loro masse, espresse in multipli della massa del protone. La massa del neutrino è finora sfuggita a ogni determinazione sperimentale.

Famiglia 1		Famiglia 2		Famiglia 3	
Particella	Massa	Particella	Massa	Particella	Massa
Elettrone	0,00054	Muone	0,11	Tau	1,9
Neutrino Elettronico	<10-8	Neutrino muonico	<0,0003	Neutrino tau	<0,033
Quark up	0,0047	Quark charm	1,6	Quark top	189
Quark down	0,0074	Quark strange	0,16	Quark bottom	5,2

3. Le forze: dov'è il fotone?

Le cose si complicano ancora se passiamo a considerare le forze della natura. Il mondo che ci circonda è pieno di interazioni: le palle vengono colpite dalle mazze, i fanatici del *bungee jumping si* buttano dai ponti, i magneti tengono un treno in levitazione sulle rotaie, i contatori Geiger scattano in presenza di radiazioni, le bombe nucleari esplodono. Possiamo esercitare la nostra influenza sugli oggetti spingendoli, tirandoli, scuotendoli, colpendoli con altri oggetti, deformandoli, riscaldandoli, congelandoli o bruciandoli. Nel corso dei secoli i fisici si sono accorti che tutte queste interazioni, e milioni di altre che incontriamo ogni giorno, si possono ridurre a una combinazione di quattro forze fondamentali: la forza *gravitazionale,* quella *elettromagnetica* e le forze nucleari *debole* e *forte*.

La gravità è la piú familiare delle quattro: ci tiene in orbita attorno al Sole e ci lascia con i piedi ben piantati per terra. La massa di un oggetto misura la quantità di forza gravitazionale che esso *può* esercitare o subire. L'elettromagnetismo ci è anche familiare: manda avanti tutte le comodità della vita moderna - lampade, computer, televisori, telefoni - ed è alla base della potenza selvaggia dei fulmini, cosí come del tocco delicato di una mano. La carica elettrica svolge lo stesso ruolo che ha la massa per la gravità e determina l'intensità della forza elettromagnetica che un corpo può sentire o esercitare.

La forza forte e quella debole sono molto meno familiari, perché la loro azione si esercita solo a scala subatomica; questo è anche il motivo per cui sono state scoperte molto piú recentemente. La forza forte tiene i quark incollati tra di loro dentro a protoni e neutroni, e tiene questi ultimi dentro ai nuclei. La forza debole è responsabile del decadimento radioattivo di sostanze come l'uranio e il cobalto.

Negli ultimi cento anni sono state scoperte due caratteristiche comuni a tutte le forze. In primo luogo, come vedremo nel capitolo V, a livello microscopico sono tutte associate a particelle che possono essere viste come il piú piccolo « pacchetto » esistente di forza. Se usate un raggio laser, state sparando un flusso *di fotoni,* i piú piccoli portatori della forza elettromagnetica. Allo stesso modo, i costituenti minimi delle forze nucleari sono *i bosoni di gauge deboli* e i *gluoni* (quest'ultimo è un nome particolarmente appropriato: *glue vuol* dire «colla» in inglese, e i gluoni sono la colla che tiene insieme i nuclei). L'esistenza e le proprietà di queste tre specie di particelle (vedi tabella 1.2) sono state dimostrate prima del 1984. Secondo i fisici, anche la gravità possiede una particella associata, *il gravitone,* la cui esistenza non è ancora stata confermata sperimentalmente.

La seconda caratteristica comune a tutte le forze è la possibilità di misurare una «carica»: cosí come la massa determina l'influenza della gravità su un corpo e la carica elettrica fa lo stesso per l'elettromagnetismo, esistono una « carica forte » e una « carica debole » che misurano gli effetti di queste forze sulle particelle. Ma anche se gli scienziati hanno misurato sperimentalmente con accuratezza queste proprietà, nessuno sa spiegare *perché* l'universo sia composto di queste particolari particelle, con queste masse e cariche stabilite.

[1] Queste tre tabelle sono un'elaborazione della tabella 1. 1. In esse sono registrate masse e cariche delle particelle comprese nelle tre famiglie. Ogni quark può presentarsi con tre cariche *forti,* ognuna etichettata con un colore - che rappresenta in realtà un valore numerico di carica forte. Le cariche deboli qui fornite sono, piú precisamente, la «terza componente» dell'isospin debole (non abbiamo fornito le componenti «destrorse» delle particelle, che non hanno carica debole).

Famiglia 1				
Particella	*Massa*	*Carica elettrica*	*Carica debole*	*Carica forte*
Elettrone	0,00054	-1	-1/2	*0*
Neutrino elettronico	<10-8	0	1/2	0
Quark up	0,0047	2/3	1/2	rosso, verde, blu
Quark down	0,0074	-1/3	-1/2	rosso, verde, blu

Famiglia 2				
Particella	Massa	Carica elettrica	Carica debole	Carica forte
Muone	0,11	-1	-1/2	0
Neutrino muonico	< 0,0003	0	1/2	0
Quark charm	1,6	2/3	1/2	rosso, verde, blu
Quark strange	0,16	-1/3	-1/2	rosso, verde, blu

Famiglia 3

Particella	Massa	Carica elettrica	Carica debole	Carica forte
Tau	1,9	-1	-1/2	0
Neutrino tau	< 0,033	0	1/2	0
Quark top	189	2/3	1/2	rosso, verde, blu
Quark bottom	5,2	-1/3	-1/2	rosso, verde, blu

Nonostante le loro caratteristiche comuni, le forze fondamentali spingono a porre altre domande. Perché ' ad esempio, sono quattro e non cinque o tre o una sola? Perché hanno proprietà cosí diverse? Perché la forza debole e quella forte operano a scala microscopica, mentre la gravità e l'elettromagnetismo hanno un raggio d'azione infinito? E perché ci sono differenze cosí enormi nella loro intensità intrinseca?

Per capire meglio l'ultima domanda, immaginate di tenere un elettrone nella mano sinistra e uno nella destra. Ora provate ad avvicinarli: la loro attrazione gravitazionale sarà contrastata dalla repulsione elettromagnetica. Chi vince? Non c'è storia: la repulsione elettromagnetica è circa un milione di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi (10^{42}) di volte piú forte. Se il vostro bicipite sinistro rappresentasse la forza gravitazionale e il destro quella elettromagnetica, quest'ultimo dovrebbe essere piú grande dell'universo conosciuto. L'unica ragione per cui gli effetti della gravità non vengono annullati nel mondo quotidiano è data dal fatto che gran parte degli oggetti sono composti da un egual numero di cariche positive e negative, che quindi si cancellano. D'altro canto, essendo la gravità sempre attrattiva, non c'è un effetto di cancellazione delle masse: piú massa significa piú forza gravitazionale. Ma, fondamentalmente, la gravità è una forza debolissima (il che spiega le difficoltà sperimentali che si incontrano nello stabilire l'esistenza del gravitone: cercare il pacchetto piú piccolo della forza piú debole è davvero una sfida). Gli esperimenti hanno anche mostrato che la forza forte è pari a circa 100 volte quella elettromagnetica e 100.000 volte quella debole. Ma per quale ragione l'universo dovrebbe essere fatto a questo modo?

Tabella 1.2.

Le quattro forze della natura, le particelle ad esse associate e le rispettive masse (in multipli della massa protonica). Le particelle della forza debole si presentano con due masse possibili. Gli studi teorici mostrano che il gravitone dovrebbe avere massa nulla.

Forza	Particella mediatrice associata	Massa
Forte	Gluone	0
Elettromagnetica	Fotone	0
Debole	Bosoni di gauge deboli	86/97
Gravità	(Gravitone)	(0)

Non è una domanda oziosa e filosofica sul perché certi dettagli sono fatti in un certo modo e non in un altro: l'universo sarebbe un luogo radicalmente diverso se le proprietà delle forze e della materia cambiassero anche di poco. Ad esempio, l'esistenza dei nuclei stabili che formano il centinaio di elementi della tavola periodica dipende in modo assai delicato dal rapporto fra l'intensità della forza forte e di quella elettromagnetica. I protoni impaccati nel nucleo, avendo tutti carica elettrica positiva, si respingono, ma la forza forte che agisce tra i loro quark, per fortuna, vince la repulsione e lega i protoni strettamente. Basterebbe un piccolo cambiamento nei rapporti tra le forze per alterare gli equilibri e per far disintegrare gran parte dei nuclei. Inoltre, se gli elettroni fossero un po' piú pesanti, si combinerebbero con i protoni a formare neutroni, ingoiando i nuclei di idrogeno (l'elemento piú semplice dell'universo, il cui nucleo è fatto di un solo protone) e impedendo la produzione di atomi piú complessi. In un contesto del genere le stelle, che si alimentano grazie alla fusione di nuclei stabili, non si formerebbero neppure. Anche l'intensità della gravitazione ha un ruolo importante. Le densità altissime raggiunte nel nucleo delle stelle rendono possibile la fusione nucleare; se la gravità fosse piú forte, i nuclei stellari sarebbero piú densi e l'attività nucleare delle stelle piú intensa. Ma cosí come un fuoco d'artificio esaurisce la sua luce prima di una candela a combustione lenta, una simile situazione farebbe bruciare le stelle come il Sole molto piú velocemente, il che avrebbe effetti letali sulla formazione della vita come la conosciamo. D'altra parte, se la gravità fosse molto piú debole la materia non si addenserebbe affatto, e quindi non si formerebbero le stelle e le galassie.

Potremmo continuare a lungo. L'idea di fondo è chiara: l'universo è fatto come lo vediamo perché le particelle costituenti la materia e le forze hanno le proprietà che sappiamo. Ma perché sono proprio queste? I Esiste una spiegazione scientifica?

4. L'idea di base della teoria delle stringhe

La teoria delle stringhe offre un paradigma concettuale forte, all'interno del quale, per la prima volta, esiste una via per rispondere a queste domande. Vediamo prima l'idea di fondo.

Le particelle della tabella 1.1. sono le «lettere » della materia. Proprio come le loro controparti alfabetiche, non sembrano essere scomponibili in ulteriori strutture interne. La teoria delle stringhe afferma il contrario: se potessimo esaminarle con maggiore dettaglio - un dettaglio di molti ordini di grandezza superiore alle nostre attuali capacità tecniche - troveremmo che le particelle non sono puntiformi, ma consistono di un minuscolo *anello* unidimensionale. Ogni particella contiene un filamento che danza, vibra, oscilla come un elastico infinitamente sottile; i fisici moderni, privi del gusto letterario di Gell-Mann, lo hanno chiamato *stringa (o corda;* in inglese è *string).* Nella figura 1.1. è mostrato il principio di base della teoria, partendo da un pezzo di materia ordinaria (una mela) e ingrandendo la sua struttura a varie scale. La teoria delle stringhe aggiunge un nuovo livello microscopico (quello della stringa) alla vecchia progressione atomo - costituenti atomici - quark.

[2] Le stringhe possono anche avere entrambi gli estremi liberi *(stringhe aperte),* oltre a presentarsi in forma di cappi, come nella figura 1. 1. Per semplificare il discorso parleremo quasi sempre di stringhe chiuse, anche se gran parte di ciò che diremo si applica a entrambi i tipi.

Anche se non sembra affatto ovvio, vedremo nel capitolo vi che rimpiazzare una particella puntiforme con una stringa risolve il conflitto tra meccanica quantistica e relatività generale. La teoria delle stringhe, dunque, scioglie il nodo gordiano della fisica teorica contemporanea. E un risultato straordinario, ma non è che uno dei motivi per cui la nuova teoria ha causato tanto interesse.

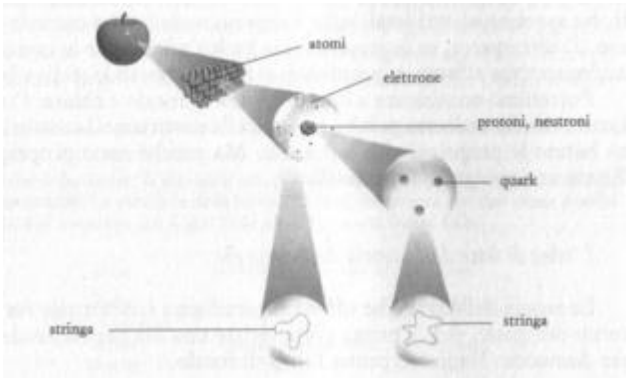

Figura 1.1

La materia è composta di atomi, che a loro volta sono fatti di quark ed elettroni. Secondo la teoria delle stringhe, tutte queste particelle sono in realtà microscopiche stringhe chiuse ad anello e in vibrazione.

5. La teoria delle stringhe come Teoria del Tutto

Ai suoi tempi la forza forte e quella debole non erano ancora note, ma Einstein era già abbastanza turbato del fatto che esistessero due forze diverse (gravità ed elettromagnetismo): non poteva accettare che la natura fosse basata su un progetto cosí stravagante. Cosí si imbarcò nella sua ricerca trentennale di una cosiddetta *teoria unificata di campo,* teoria che avrebbe dovuto mostrare che queste due forze sono in realtà manifestazioni di un unico principio sottostante. Questa ricerca ossessiva lo isolò dal filone principale della ricerca, allora molto piú interessato (comprensibilmente) a esplorare la nascente meccanica quantistica. Scriveva a un amico nel 1942: «Sono diventato un vecchio solitario famoso soprattutto perché non porta le calze, che viene esibito come un fenomeno nelle occasioni speciali».

[3] Da una lettera di Albert Einstein del 1942, citata in Tony Hey e Patrick Walters, *Einstein's Mirror,* Cambridge University Press, Cambridge 1997

Einstein era semplicemente troppo avanti sui tempi. Piú di mezzo secolo dopo, la teoria unificata è diventata il Sacro Graal della fisica moderna. E una consistente parte della comunità dei fisici e dei matematici è convinta sempre più che la teoria delle stringhe possa essere la soluzione. A partire da un unico principio (gli oggetti sono formati a livello microscopico da combinazioni di stringhe oscillanti), la teoria fornisce un quadro esplicativo che comprende tutte le forze e tutta la materia.

Secondo la teoria delle stringhe, ad esempio, le proprietà osservate delle particelle viste nelle tabelle 1. 1 e 1. 2 non sono che un riflesso dei vari modi in cui una stringa può vibrare. E' proprio come per le corde di un violino o di un pianoforte, che vibrano con frequenze caratteristiche in modi che il nostro orecchio percepisce come le note fondamentali e le rispettive armoniche superiori; le vibrazioni delle stringhe della teoria non si manifestano come note musicali, ma come particelle, la cui massa e carica sono determinate dalle oscillazioni della stringa stessa: l'elettrone è una stringa che vibra in un certo modo, il quark up in un altro, e cosí via. Le proprietà delle particelle, dunque, non sono una caotica massa di dati sperimentali, ma conseguenze di un unico principio fisico: sono la musica, per cosí dire, suonata dalle stringhe fondamentali. La stessa idea si applica alle forze; vedremo infatti che ogni particella mediatrice di forza è associata a un particolare modo di vibrazione. Quindi tutte le forze e tutta la materia sono unificate sotto la voce «Oscillazioni di stringhe»: sono le note che le stringhe suonano.

Per la prima volta nella storia della fisica possediamo un'idea di fondo in grado di spiegare tutte le caratteristiche fondamentali alla base dello schema costruttivo dell'universo. Per questo motivo molti pensano alla teoria delle stringhe come candidata al ruolo di «Teoria del Tutto» (una *TOE*, come la chiamano gli anglosassoni, acronimo di *Theory of Everything),* nome un po' pomposo per una teoria di massimo livello di profondità, capace di comprendere tutte le altre, senza che ci sia bisogno di ulteriori spiegazioni. Nella pratica, chi si occupa di teoria delle stringhe ha i piedi piú per terra e pensa alla sua teoria come a un oggetto capace di descrivere tutte le proprietà delle particelle fondamentali e delle loro interazioni. Un riduzionista rigoroso potrebbe dire che non c'è nessuna differenza: in linea di principio, tutto, dal big bang ai sogni, può essere descritto in termini di processi microscopici di tipo fisico che interessano i costituenti fondamentali della materia. Sapere tutto sulle particelle di base vuol dire sapere anche tutto il resto.

Poche cose sono in grado di scaldare gli animi quanto il riduzionismo. C'è chi trova presuntuoso, quando non ripugnante, sostenere che le meraviglie del cosmo siano meri riflessi dei comportamenti di un pugno di particelle che danzano secondo la vacua coreografia delle leggi fisiche. Ma davvero la gioia, il dolore o la noia non sono che processi chimici interni al cervello, reazioni tra atomi e molecole, e quindi tra particelle come quelle della tabella 1.1, che in realtà sono solo stringhe che vibrano? Il premio Nobel Steven Weinberg risponde cosí a queste critiche:

All'altro capo ci sono gli avversari del riduzionismo, che sono indignati da quella che a loro sembra la tristezza della scienza moderna. Si sentono sminuiti dal fatto che il loro mondo può essere ridotto a questioni di particelle e di interazioni [...] Non mi sembra il caso di rispondere a queste critiche con un discorsetto edificante sulle meraviglie della scienza moderna. La visione del mondo di un riduzionista è *davvero* fredda e impersonale: deve essere accettata cosí com'è, non perché ci piace, ma perché cosí funzionano le cose.

[4] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory,* Pantheon, New York 1993, *P.* 52 [trad. it. *Il sogno dell'unità dell'universo,* Mondadori, Milano 1993, P. 57 e sgg

C'è chi è d'accordo con queste affermazioni forti, e chi no.

Secondo altri studiosi, teorie come quella del caos ci mostrano che al crescere della complessità di un sistema entrano in gioco altri tipi di leggi: conoscere il comportamento di un elettrone o di un quark è un conto, applicare questa conoscenza per prevedere il tragitto di un tornado è un altro. Su questo punto molti concordano. Ma le opinioni divergono quando si tratta di stabilire se i fenomeni inattesi che avvengono al crescere della complessità siano manifestazioni di vere e proprie nuove leggi fisiche, o se si tratti di conseguenze - anche se terribilmente complicate da dimostrare -delle leggi che governano le singole, moltissime particelle elementari. Ho l'impressione che quest'ultima ipotesi sia giusta. Il fatto che sia impossibile spiegare le proprietà di un tornado in termini di elettroni e quark, mi sembra piú un problema computazionale che un segnale della presenza di nuove leggi fisiche. Ma, ripeto, non tutti sono d'accordo.

Ciò che non deve essere messo in discussione anche dai piú incalliti riduzionisti (e questo è di importanza fondamentale nel prosieguo del libro) è che i principi sono una cosa e la pratica un'altra. Tutti (o quasi) sono d'accordo nell'affermare che la scoperta di una TOE non significherebbe la fine della psicologia, della biologia, della geologia, della chimica o persino della fisica. L'universo è troppo complesso per far si che una sola teoria, seppur «definitiva» nel senso in cui la intendiamo qui, possa far suonare a morto la campana della scienza. Al contrario: una TOE sarebbe il solido fondamento su cui costruire la nostra comprensione del inondo, e la sua scoperta segnerebbe un inizio, non una fine. La «teoria ultima » sarebbe un indistruttibile baluardo di coerenza che ci rassicurerebbe per sempre sulla penetrabilità dei misteri dell'universo.

6. Lo stato della teoria delle stringhe.

Scopo principale di questo libro è spiegare il funzionamento dell'universo secondo la teoria delle stringhe, con un'attenzione particolare Alle conseguenze di questa nuova idea sulle nostre concezioni di spazio e tempo. Al contrario di quanto normalmente accade per i saggi divulgativi, qui non parleremo di una teoria completamente definita, con solide conferme sperimentali e largamente accettata dalla comunità scientifica. Come vedremo nei prossimi capitoli, la teoria delle stringhe è una costruzione cosí originale e sofisticata che il lavoro da fare per considerarla compiuta è ancora molto, nonostante i progressi impressionanti degli ultimi anni.

La nostra teoria è dunque un'opera *in fieri,* la cui struttura di base ha già svelato sorprendenti scorci sulla natura di spazio, tempo e materia. L'unione armoniosa della relatività generale e della meccanica quantistica è un grande successo. La capacità di rispondere a certe domande basilari sui costituenti fondamentali di forza e materia è un risultato mai raggiunto prima. Altrettanto importante, anche se piú difficile da apprezzare, è la grande eleganza della teoria: molti aspetti dell'universo che sembrano arbitrari dettagli tecnici - come il numero e le proprietà delle particelle fondamentali - diventano conseguenze di caratteristiche tangibili della geometria del cosmo. Se la teoria delle stringhe è giusta, la trama microscopica dell'universo è un intricato labirinto a piú dimensioni in cui le stringhe vibrano senza posa, «dando il ritmo» alle leggi naturali, e in cui le proprietà fondamentali degli oggetti non sono arbitrarie ma discendono da questa complessa struttura.

Alla fine delle ricerche, comunque, nulla potrà sostituirsi a un insieme di affermazioni verificabili che ci sapranno

dire, una volta testate, se la teoria delle stringhe ha davvero sollevato il velo sui piú reconditi misteri dell'universo. Potrebbe volerci del tempo prima che questo accada, anche se (come vedremo nel capitolo IX) sembra che alcuni esperimenti potranno fornire solide basi alla teoria entro una decina di anni. Vedremo anche (nel capitolo XIII) che con la teoria delle stringhe si è risolto di recente un problema fondamentale sui buchi neri (che ha a che fare con la cosiddetta entropia di Bekenstein-Hawking) che resisteva da venticinque anni, un successo che ha convinto molti scienziati del fatto che si è sulla strada giusta.

Secondo Edward Witten, un pioniere della teoria nonché uno dei suoi massimi esponenti, la teoria delle stringhe « è un pezzo di fisica del ventunesimo secolo che si è trovata per caso nel ventesimo» [5] Conversazione con Edward Witten, 11 maggio 1998. (un'affermazione fatta in origine dal noto fisico italiano Daniele Amati). In un certo senso è come se i fisici dell'Ottocento si fossero trovati tra le mani un nostro moderno supercalcolatore, senza le istruzioni per l'uso. Con l'ingegno, per tentativi ed errori, sarebbero arrivati a intuire le potenzialità della macchina, ma imparare davvero a usarla avrebbe richiesto sforzi notevolissimi. Però l'aver immaginato le straordinarie capacità del computer sarebbe stato un forte incentivo per arrivare a padroneggiarlo. Una motivazione analoga dà oggi la carica a un'intera generazione di fisici teorici, impegnati nel tentativo di conoscere la teoria delle stringhe in modo completo e analitico.

Le osservazioni di Witten e di altri esperti sembrano indicare che potrebbero volerci decenni, se non secoli, prima di arrivare al pieno successo. Il che potrebbe essere vero. La matematica alla base della teoria è cosí complessa che, a oggi, nessuno è in grado di scriverne l'equazione fondamentale; se ne conoscono solo versioni approssimate, e persino queste sono state risolte solo in parte. Tuttavia, una serie di grandi scoperte avvenute nella seconda metà degli anni novanta - che hanno permesso di rispondere a domande teoriche di inimmaginabile difficoltà - sembrano indicare che l'approdo a una soluzione quantitativa sia piú vicino di quanto si pensi. I fisici sparsi per il mondo stanno perfezionando nuove tecniche per superare i metodi approssimati usati finora, e i vari pezzi del puzzle si stanno incastrando a velocità incoraggiante.

Queste nuove tecniche si stanno anche rivelando nuovi punti di vista sotto i quali osservare alcuni aspetti di base della teoria noti da tempo.

Per fare un esempio, una delle prime domande che potreste porvi dopo un'occhiata alla figura 1.1 è: perché proprio le stringhe? Non potrebbero essere piccoli dischi, o pallottole di materia, o una combinazione di queste forme? Come vedremo nel capitolo XII, le ultime scoperte mostrano che tutte queste varianti ipotetiche giocano *davvero* un ruolo importante nella teoria delle stringhe, che risulta far parte di una teoria di sintesi ancora piú grande, chiamata (in modo un po' misterioso) M-teoria. Di tutto questo ci occuperemo negli ultimi capitoli del libro.

La scienza va avanti a scatti: ci sono periodi pieni di scoperte eccezionali, ed altri in cui i ricercatori non cavano un ragno dal buco. Gli scienziati presentano i loro risultati, sia teorici sia sperimentali, e questi sono esaminati dai colleghi. Le ipotesi a volte sono scartate, altre volte vengono modificate, altre volte ancora servono come ispirazione per nuove e migliori teorie che ci permettono di capire meglio l'universo fisico. Il percorso della scienza è cominciato con i primi tentativi dell'uomo di penetrare i misteri del cosmo e terminerà chissà quando; ci conduce per strade tortuose verso quella che speriamo essere la verità ultima. Non sappiamo se la teoria delle stringhe sia una fermata accidentale in questo cammino o un bivio decisivo o magari la destinazione finale. Ma il lavoro di centinaia di ricercatori negli ultimi vent'anni ci ha dato una speranza non illusoria che siamo sulla strada giusta.

La teoria delle stringhe, anche col poco che ne sappiamo, ci ha fornito intuizioni straordinarie sulla struttura del cosmo, e questo la dice lunga sulla sua forza. In quel che segue ci occuperemo soprattutto di come la teoria abbia permesso di proseguire la rivoluzione iniziata da Einstein e dalla sua teoria della relatività, ristretta e generale. Vedremo che, se la teoria delle stringhe è giusta, l'universo in cui viviamo ha caratteristiche che nemmeno Einstein si sarebbe mai sognato.

Capitolo secondo

Spazio e tempo nell'occhio di chi guarda

Nel giugno *1905,* all'età di ventisei anni, Einstein propose alla rivista «Annalen der Physik» un articolo tecnico in cui veniva a capo di un paradosso riguardante la luce, che lo aveva turbato fin dall'adolescenza. Arrivato alla fine del manoscritto, il direttore della rivista, Max Planck, si rese conto che la tradizionale visione scientifica del mondo era stata sovvertita: senza fare troppo rumore, un impiegato dell'ufficio brevetti di Berna aveva rivoluzionato le idee accettate di spazio e di tempo, sostituendole con una teoria che faceva a pugni con il senso comune.

Qual era il paradosso che tanto aveva colpito Einstein? A metà dell'Ottocento, il fisico scozzese James Clerk Maxwell, basandosi sui lavori sperimentali dell'inglese Michael Faraday, aveva scoperto che la forza elettrica e quella magnetica potevano essere riunite nell'ambito di un unico fenomeno detto *campo elettromagnetico.* Se avete mai visto un generatore di Van de Graaf in un laboratorio, o se vi siete mai trovati in cima a un monte poco prima dell'arrivo di un temporale, allora saprete di cosa stiamo parlando: avete sentito il campo elettromagnetico in azione. Nel caso non aveste mai fatto questa esperienza, sappiate che è come un'onda di marea composta da linee di forza elettriche e magnetiche, che permea la regione di spazio attraverso cui passa. Se mettete della limatura di ferro vicino a un magnete, ad esempio, la vedrete disporsi secondo curve che rivelano la presenza di queste invisibili linee di forza. Quando vi togliete un maglione di lana in un giorno molto secco, e vi prendete una piccola scossa, state sperimentando gli effetti del campo elettrico, generato dalle cariche che le fibre della maglia hanno accumulato.

Oltre a riunire elettricità e magnetismo in un'unica cornice matematica, la teoria di Maxwell riuscì a mostrare - in modo inaspettato che le perturbazioni elettromagnetiche si muovevano con velocità sempre uguale, velocità che si scoprì essere quella della luce. Da ciò Maxwell dedusse che la stessa luce visibile non è che un tipo particolare di onda elettromagnetica, che oggi sappiamo essere in grado di interagire con gli elementi chimici della retina e di permettere il senso della vista. Fatto ancor piú importante, la teoria di Maxwell mostra che le onde elettromagnetiche sono viaggiatrici instancabili: non si fermano mai, né rallentano. La luce viaggia *sempre* alla stessa velocità.

Tutto funziona bene, fino a quando non ci chiediamo (come il sedicenne Einstein) cosa accadrebbe se ci mettessimo a inseguire un raggio di luce alla sua stessa velocità. Un ragionamento intuitivo basato sulle leggi di moto newtoniane ci porta a concludere che arriveremo a raggiungere una velocità alla quale la luce ci sembra ferma. Ma secondo la teoria di Maxwell, e con molti dati sperimentali a conforto, la «luce ferma» non può esistere: nessuno ha mai tenuto un raggio di luce posato sul palmo. Da qui il paradosso. Per sua fortuna, Einstein non sapeva che i migliori fisici del mondo stavano lottando con questo problema (e molti stavano prendendo strade sbagliate); cosí si mise a rimuginare sui problemi delle teorie di Maxwell e Newton in modo molto personale.

In questo capitolo vedremo come Einstein risolse il paradosso grazie alla sua teoria della relatività ristretta, e come questa cambiò per sempre la nostra concezione di spazio e di tempo. Forse può sorprendervi apprendere che la relatività ristretta si occupa soprattutto di capire come il mondo appare esattamente ai singoli individui, detti *osservatori,* che si muovono uno rispetto all'altro. Sembra una questione marginale, un puro esercizio intellettuale; al contrario, nelle mani di Einstein, e nei suoi sogni popolati di osservatori che inseguono raggi di luce, questa linea di pensiero giunge a conclusioni profonde su questioni basilari, anche legate alla nostra esperienza quotidiana.

1. Le pecche dell'intuizione

L'esperienza comune ci mostra già in quali modi le osservazioni di un soggetto in movimento possono differire da

quelle di uno fermo. Gli alberi a lato di una strada, ad esempio, sembrano muoversi incontro a chi guida ma appaiono fermi all'autostoppista seduto sul ciglio. Allo stesso modo il cruscotto della macchina è fermo per l'autista (si spera!) ma è in moto per l'autostoppista. Sono proprietà cosí note e comuni del mondo in cui viviamo che quasi non ci facciamo caso.

Secondo la relatività ristretta, però, le differenze tra i due personaggi dell'esempio sono assai piú profonde. Einstein sostiene la strana teoria secondo cui due osservatori in moto relativo l'uno rispetto all'altro hanno diverse percezioni del tempo e delle distanze. Come vedremo, questo significa che due orologi identici, indossati da due simili osservatori, non segnano le ore in modo sincrono e quindi non concordano sugli intervalli di tempo trascorsi tra due eventi fissati. La relatività ristretta dimostra che questa affermazione non ha nulla a che fare con la precisione degli orologi, ma anzi che è una caratteristica vera e propria del fenomeno «tempo ».

Allo stesso modo, due osservatori in moto relativo dotati di un identico metro campione non concorderanno sulle misure delle distanze. Anche in questo caso non abbiamo a che fare con imprecisioni degli strumenti o con errori nel loro uso: i piú precisi sistemi di misurazione esistenti ci confermano che lo spazio e il tempo - cioè le distanze e le durate - non sono esperiti allo stesso modo da tutti. La relatività ristretta risolve in modo assai preciso il conflitto tra la nostra intuizione del moto e le proprietà della luce. Però c'è un prezzo da pagare per questo: due individui in moto l'uno rispetto all'altro non saranno d'accordo sulle rispettive misurazioni di distanze e tempi.

E passato quasi un secolo dal giorno in cui Einstein svelò al mondo la sua impressionante scoperta, eppure quasi tutti pensiamo ancora a spazio e tempo in termini assoluti. La relatività ristretta non ci è ancora entrata nel sangue: non la sentiamo giusta. Le sue conclusioni non trovano spazio nelle nostre percezioni intuitive. La ragione per questo rifiuto è molto semplice: gli effetti della relatività ristretta dipendono dalla velocità con cui ci si muove; sulle automobili, sugli aerei o persino sullo Shuttle questi effetti sono minuscoli. Certo, le differenze di percezione tra chi sta fermo e chi vola in aereo esistono *davvero,* ma sono cosí piccole che nessuno le nota. Ma stiamo per imbarcarci su un veicolo fantascientifico che viaggia a velocità prossima a quella della luce, dove la relatività ristretta si mostra in tutta la sua evidenza. Certo, siamo nel campo della fantasia, ma vedremo che esistono davvero esperimenti ingegnosi in grado di mostrare in modo preciso le proprietà dello spazio e del tempo previste da Einstein.

Per avere un'idea degli ordini di grandezza, facciamo un salto nel passato. E il *1970,* e le macchinone dalla cilindrata enorme sono ancora in voga. Il nostro amico Slim ha appena speso tutti i suoi risparmi in uno di questi mostri; oggi va con suo fratello Jim a provare la macchina su una strada larga e diritta, dove lanciarsi a tutto gas. Mentre riscalda il motore, il fratello lo aspetta piú in là munito di cronometro. Slim però vuole un'altra conferma della sua velocità, e cosí porta con sé un cronometro identico. Non conoscendo Einstein, nessuno metterebbe in dubbio il fatto che, in assenza di guasti, i tempi misurati dai due fratelli siano uguali. Ma a causa della relatività ristretta, se secondo Jim la macchina ha impiegato diciamo 30 secondi a compiere il percorso, per Slim i secondi sono «solo» 29,99999999999952. Certo è una differenza così piccola che un cronometro manuale non saprebbe rilevarla, né se è per questo - un orologio atomico della piú alta precisione. Non ci sorprende che la nostra esperienza quotidiana non faccia trapelare nulla sul fatto che il tempo dipende dallo stato di moto.

La stessa cosa succede per le distanze. In un altro test, Jim usa un accorgimento ingegnoso per misurare la lunghezza dell'auto: fa partire il cronometro quando la punta del cofano lo raggiunge, e lo ferma quando tutta la macchina gli è sfilata davanti. Poiché Jim conosce la velocità di Slim (diciamo 200 all'ora) è in grado di calcolare la lunghezza moltiplicando il tempo per la velocità. Anche qui, chi mai penserebbe che il risultato di Jim sia diverso da quello ottenuto da Slim a macchina ferma. Eppure la relatività ristretta dice proprio cosí: se Slim trova una lunghezza di 4,80 metri, i calcoli di Jim portano invece a 4,79999999999958 metri. Una differenza anche in questo caso minuscola, che nessuno strumento di misura potrebbe rivelare.

Differenze microscopiche, certo, ma che mostrano comunque una pecca insanabile nella concezione comune di un tempo e uno spazio immutabili e universali. Al crescere della velocità relativa di Slim e Jim, la frattura diventa sempre piú visibile. Per vedere effetti apprezzabili, dobbiamo arrivare a velocità comparabili con quella della luce, che è la massima velocità possibile; il suo valore, secondo la teoria di Maxwell e le misure sperimentali, è pari a circa 300 000 chilometri al secondo, cioè piú di un miliardo di chilometri all'ora: un raggio di luce fa il giro della Terra sette volte al secondo. Se la macchina di Slim viaggiasse ad esempio a 900 milioni di chilometri all'ora (circa l'84 per cento della velocità della luce), secondo Jim la sua lunghezza sarebbe di soli 2,3 metri, cioè molto meno di quanto misurato da Slim (e da quanto scritto

sul libretto dell'auto). E il tempo cronometrato dal fratello fermo sarebbe quasi il doppio di quello registrato da Slim in macchina.

Queste velocità enormi sono molto distanti dalle nostre possibilità tecniche; ecco perché gli effetti della «dilatazione dei tempi» e della «contrazione di Lorentz » (come vengono chiamati questi fenomeni dai fisici) non sono visibili nella vita quotidiana. Se vivessimo in un mondo in cui gli oggetti viaggiano abitualmente a velocità altissime, queste proprietà sarebbero esperite in continuazione e sarebbero cosí intuitive da non richiedere maggiori spiegazioni di quante ne riserviamo al moto apparente degli alberi sul ciglio della strada. Ma il nostro mondo non è cosí. Accettare e capire queste idee richiede un vero rovesciamento della nostra prospettiva.

2. Il principio di relatività

Le fondamenta della relatività ristretta stanno in due principi semplici quanto profondi. Uno riguarda la velocità della luce: ne abbiamo già parlato e lo approfondiremo nei prossimi paragrafi. L'altro è piú astratto e riguarda tutte le leggi fisiche indistintamente. Si tratta del principio di relatività. Il suo assunto di base è semplice: quando si parla di velocità (intesa come valore assoluto e come direzione) si deve sempre specificare chi o cosa sta compiendo le misurazioni. La storiella che segue ci aiuterà a capire il senso e l'importanza del principio.

L'astronauta George sta fluttuando nel buio assoluto dello spazio cosmico, vuoto e freddo, lontano da pianeti, stelle o galassie. E riparato dalla sua tuta spaziale, su cui è posta una piccola luce rossa lampeggiante. Dal suo punto di vista, George è perfettamente fermo, circondato dall'oscurità. Improvvisamente nello spazio appare una piccola luce verde che si avvicina sempre piú. E la sua compagna Mildred, un'altra abitante dello spazio che fluttua nei paraggi. Gli passa accanto, lo saluta e poi si perde nell'oscurità. Naturalmente, la stessa storia può essere raccontata dal punto di vista di Mildred: si comincia con la nostra astronauta immersa nel buio, poi appare una luce rossa in lontananza, che si scopre essere quella di George, che passa, saluta e scompare nell'oscurità.

L'evento è uno solo ma i punti di vista sono due. Entrambi gli osservatori pensano di essere fermi e percepiscono l'altro in movimento. Entrambi i punti di vista sono validi: vista la simmetria tra i due, non c'è alcun modo per stabilire chi ha «ragione» e chi «torto».

Questa storia illustra l'essenza del principio di relatività: il concetto di moto è relativo. Possiamo parlare di « moto di un oggetto » solo in relazione con un altro. L'affermazione «George sta passando ai 10 all'ora» è priva di senso se non specifichiamo rispetto a cosa: un enunciato corretto è invece «George sta passando accanto a Mildred ai 10 all'ora», dove Mildred diventa la nostra pietra di paragone. Ovviamente, l'ultima affermazione equivale perfettamente a questa: « Mildred sta passando accanto a George ai 10 all'ora (nella direzione opposta) ». Non esiste alcuna nozione assoluta di moto: il moto è relativo a qualcosa.

Un aspetto importante della storia è il fatto che né George né Mildred vengono spinti, tirati o influenzati in altro modo da qualcosa che potrebbe disturbare il loro pacifico stato di moto costante in assenza di forze. « Il moto in assenza di forze», a questo punto, ha senso solo in rapporto ad altri oggetti. E' un punto importante da chiarire, perché le forze causano cambiamenti nella velocità degli osservatori, e questi cambiamenti possono essere percepiti. Se George avesse un paio di razzi sulla schiena e li accendesse, avvertirebbe senz'altro la sensazione di moto. E' una sensazione intrinseca: all'accensione dei razzi, George *sa* che si sta muovendo, anche se ha gli occhi chiusi e non può fare raffronti con altri oggetti; non può affermare: « Il resto del mondo si sta spostando rispetto a me». Il moto a velocità *costante è* relativo, mentre cosí non è per il cosiddetto moto *accelerato,* cioè non costante (ritorneremo su questa affermazione nel prossimo capitolo, quando parleremo di moto accelerato e di relatività generale).

Ambientare le nostre storie nello spazio buio e vuoto ci semplifica la vita, perché non dobbiamo fare i conti con cose come strade e palazzi, a cui diamo - anche se non a ragione - la patente di oggetti «stazionari». Ma dello stesso principio possiamo fare esperienza anche in ambienti molto familiari .

[1] La presenza di corpi massicci come la Terra complica le cose, introducendo le forze gravitazionali. Poiché ci stiamo concentrando sul moto in direzione orizzontale, e non in quella verticale, possiamo ignorare la presenza dell'attrazione terrestre. Nel prossimo capitolo ci occuperemo in dettaglio della gravità.

Immaginate di esservi addormentato sul treno; quando vi svegliate, un altro convoglio passa sul binario accanto. La vista dal finestrino è bloccata dalle carrozze e non avete altri oggetti con cui fare paragoni. Concorderete che ci vuole un po' di tempo per decidere quale dei due treni si stia muovendo (o se lo facciano entrambi). Certo, se il treno su cui siete sta sobbalzando, o se sta curvando, avete la sensazione del movimento. Ma a velocità costante e in assenza di scuotimenti si osserva un moto relativo tra i due convogli senza poter stabilire quale si muova.

Facciamo un passo avanti. Sempre sul vostro treno, tirate le tende del finestrino. Senza la possibilità di vedere cosa accade all'esterno, se il treno si muove a velocità costante non potrete determinare in alcun modo il vostro stato di moto. Lo scompartimento in cui vi trovate sembrerà lo stesso sia che siate fermi sia che stiate correndo ad alta velocità. Questa intuizione, formalizzata da Einstein, risale in realtà a Galileo. Siamo arrivati al cuore del principio di relatività: il moto in assenza di forze è relativo e dunque ha senso solo in rapporto ad altri oggetti, anch'essi in assenza di forze. Non c'è modo di determinare il nostro stato di moto senza fare paragoni diretti o indiretti con l'esterno. La nozione di velocità costante «assoluta» non ha semplicemente senso.

Einstein si rese conto che il suo principio aveva una formulazione assai piú generale: le leggi fisiche, qualunque esse siano, devono essere assolutamente identiche per tutti gli osservatori in stato di moto costante. Se George e Mildred, oltre a fluttuare nel cosmo, stessero conducendo una serie di esperimenti nelle loro postazioni spaziali, troverebbero risultati identici. A parità di apparati sperimentali, infatti, la situazione è perfettamente simmetrica ed entrambi sono giustificati ad affermare di essere in quiete. Le leggi fisiche che essi deducono sono quindi identiche. Né i loro corpi né gli apparati sperimentali « sentono » (o meglio, nel caso degli apparecchi, «sono influenzati da») il moto costante. Questo semplice concetto è ciò che stabilisce la simmetria tra i due osservatori, ed è parte del principio di relatività. Ne faremo uso tra poco per giungere a conclusioni importanti.

3. La velocità della luce.

Il secondo ingrediente di base della relatività ristretta ha a che fare con le proprietà del moto della luce. Abbiamo appena visto che l'affermazione «George sta passando ai 10 all'ora» non ha senso se non specifichiamo rispetto a cosa stiamo misurando la velocità. Ebbene, un secolo di esperimenti ci mostra invece che, secondo tutti gli osservatori la luce viaggia sempre a 300 000 chilometri al secondo, *senza che sia necessario specificare altro.*

Questo fatto ha reso necessaria una rivoluzione nel nostro modo di vedere l'universo. Cerchiamo di capirlo meglio pensando, per contrasto, all'esperienza quotidiana. E' una bella giornata e voi uscite a giocare a tennis con un amico. Per un po' palleggiate senza problemi, con la pallina che viaggia, diciamo, a 8 metri al secondo. Improvvisamente una tempesta elettrica scoppia nel cielo e voi correte a ripararvi. La tempesta passa, ma rientrando in campo vi accorgete che il vostro amico si è tramutato in un folle dai capelli dritti e dagli occhi iniettati di sangue. Con terrore, notate che vi sta lanciando non una pallina ma una bomba a mano. Passata ogni voglia di giocare, vi mettete a correre. La bomba sta viaggiando nella vostra direzione, ma poiché state correndo piú o meno a 5 metri al secondo, sapete che la sua velocità rispetto a voi è di soli (8 - 5) = 3 metri al secondo. Secondo la stessa logica, se in montagna vedete una valanga che sta per investirvi, vi mettete a correre in direzione opposta, perché sapete che cosí ridurrete la velocità con cui il pericolo si avvicina - il che in genere è un bene.

Ora mettiamo a confronto le nostre osservazioni su palline, bombe e valanghe con la luce. Per rendere gli oggetti meglio comparabili, pensate alla luce come costituita da tante «palline » chiamate fotoni (ne parleremo al capitolo IV). Quando accendiamo una torcia elettrica, in effetti stiamo sparando un flusso di fotoni nella direzione in cui la puntiamo. Vediamo come appare il moto dei fotoni a un osservatore a sua volta in movimento. Il vostro amico folle ora ha abbandonato le bombe e impugna un fucile laser. Quando vi spara addosso - se siete dotati di appositi apparati di misurazione -trovate che la velocità dei fotoni che vi arrivano contro è di 1.072.000.000 km/h. Pensate di mettervi a correre, come avete fatto per la bomba a mano; per rendere le cose piú eccitanti, immaginate di riuscire a saltare *sull'Enterprise* e di schizzare via a 150.000.000 km/h. Secondo la fisica newtoniana, poiché vi state allontanando, la velocità dei fotoni che vi stanno venendo addosso dovrebbe per voi ridursi, per la precisione a (1072 - 150 =) 922 milioni di km/h.

Ma non è quanto sperimentereste. Oltre che dalle accurate deduzioni dalle leggi di Maxwell, questo fatto è dimostrato da molti esperimenti, i primi dei quali risalgono alla fine dell'Ottocento. *Anche se vi state allontanando, la velocità del fascio di fotoni è sempre di* 300.000 *km/sec.* Può sembrare folle a prima vista, dato ciò che sappiamo di palline, bombe e valanghe, ma è così. Sia che scappiate dai fotoni sia che li rincorriate, la loro velocità rispetto a voi sarà sempre la stessa.

L'«esperimento» con i fotoni che abbiamo immaginato poc'anzi non può essere eseguito per evidenti limiti tecnologici. Ma ci sono esperienze che invece si possono fare. Ad esempio, nel 1913 il fisico olandese Willem de Sitter pensò di utilizzare le osservazioni sulle stelle binarie piú veloci (stelle doppie che orbitano l'una attorno all'altra) per verificare l'effetto del moto sulla velocità della luce. Tutte le misurazioni eseguite negli anni a venire hanno confermato la stessa cosa: la luce emessa da una stella ferma ha la stessa velocità di quella emessa da una stella in movimento - e questo nei limiti di precisione di strumenti sempre piú raffinati. Tutti gli altri esperimenti condotti in questo secolo (che misurano la velocità della luce in vari modi diretti o indiretti) hanno avuto lo stesso risultato.

Se non riuscite a mandare giù questa idea, consolatevi: non siete i soli. Tra Otto e Novecento i fisici cercarono in tutti i modi di confutarla, ma senza successo. Einstein invece abbracciò con gioia il principio della costanza della velocità della luce, perché era quello che gli serviva per risolvere il problema che lo turbava. Possiamo inseguire un raggio di luce finché vogliamo, ma questo si allontana da noi sempre alla stessa velocità: non riusciamo a farlo rallentare neanche un po', né certamente a farlo apparire stazionario. Il caso era chiuso. E c'era di piú: Einstein si rese conto che questo principio era l'inizio della fine della fisica newtoniana.

4. La verità e le sue conseguenze.

La velocità misura la distanza che un oggetto può percorrere in un intervallo di tempo fissato: una macchina che va a 100 chilometri all'ora percorrerà 100 chilometri se persiste nel suo stato di moto costante per un'ora. Messo cosí, il fatto sembra banale; perché tutto questo affannarsi con palline, bombe e fotoni? Notiamo però che la «distanza» implica un concetto di spazio e che la «durata» dell'intervallo mette in causa l'idea di tempo. La velocità, dunque, è intimamente connessa con i concetti di spazio e di tempo. Ripensandoci, vediamo allora che un fatto sperimentale che mette alla prova la nostra idea comune di velocità, come la costanza della velocità della luce, ha il potenziale per minare la comune percezione di spazio e tempo. Ecco perché questa stranezza riguardo alla luce deve essere esaminata con attenzione, proprio come fece Einstein per arrivare alle sue straordinarie conclusioni.

5. L'effetto sul tempo, parte prima.

Con un piccolo sforzo, possiamo usare la costanza della velocità della luce per dimostrare che l'idea comune di tempo è del tutto sbagliata. Immaginate che i presidenti di due nazioni in guerra, seduti ai lati opposti di un lungo tavolo per le trattative, siano giunti ad un accordo per un cessate il fuoco, ma che facciano i capricci perché nessuno vuole firmarlo prima dell'altro. Al Segretario generale dell' Onu viene un'idea geniale: piazzerà una lampadina a metà del tavolo e quando si accenderà entrambi potranno firmare il trattato. Essendo i presidenti equidistanti dalla sorgente, la luce arriverà contemporaneamente. Il trucco funziona e tutti sono soddisfatti.

Inebriato dal successo, il Segretario generale vuole usare lo stesso metodo con altre due nazioni nella stessa situazione. Stavolta, però, il tavolo e i presidenti si trovano su un treno in corsa a velocità costante. Come è giusto che sia, il presidente dell'Avantia siede in direzione del moto, faccia a faccia con quello dell'Indietria. Il Segretario generale conosce un po' di fisica e sa che le leggi non cambiano per tutti gli osservatori in stato di moto costante; può allora eseguire la cerimonia della lampadina. Il trattato è firmato e i presidenti brindano con il loro entourage alla fine delle ostilità.

Ma proprio in quel momento giunge la notizia che alcuni uomini delle due nazioni hanno assistito alla cerimonia da terra e che hanno subito ripreso a combattere. I dignitari sul treno sono allibiti nell'apprendere che gli abitanti di Avantia sono convinti di essere stati ingannati, perché il loro presidente ha firmato l'accordo prima che lo facesse quello di Indietria. Sul treno, tutti, da entrambe le parti, concordano sul fatto che la firma è stata simultanea; com'è possibile che gli

uomini fuori del treno la pensino diversamente?

Vediamo piú in dettaglio il punto di vista di un osservatore fermo. La lampadina è inizialmente spenta; a un certo punto si illumina mandando due raggi di luce verso i presidenti. Per chi è fermo, il presidente di Avantia si sta avvicinando alla luce, mentre quello di Indietria se ne sta allontanando. Questo significa che la luce deve fare meno strada per raggiungere il primo (che le sta venendo incontro) e di piú per colpire il secondo (che le sta sfuggendo). Questa affermazione non riguarda la *velocità* della luce nei due casi, che abbiamo già visto essere la stessa: stiamo soltanto parlando di *distanze.* Calcoliamo dal punto di vista dell'osservatore esterno quanta strada deve fare la luce per raggiungere i presidenti. Poiché la distanza verso il lato del presidente di Avantia è minore, e poiché la velocità è costante, la luce arriverà prima da lui. Ecco perché i suoi concittadini pensano di essere stati ingannati.

Ora, sul treno, tutti stanno ascoltando il resoconto dell'evento da parte della Cnn. Nessuno crede alle proprie orecchie: la lampadina era ben fissata, esattamente a metà del tavolo, e quindi è ovvio che la luce emessa deve aver percorso spazi uguali nelle due direzioni. Essendo la velocità costante, i passeggeri del treno pensano - anzi, hanno osservato - che la firma sia stata simultanea.

Chi ha ragione? Entrambe le osservazioni e le deduzioni sono impeccabili. Quindi *tutti* hanno ragione, proprio come i nostri astronauti George e Mildred. L'unica differenza, qui, è che le conclusioni sembrano essere contraddittorie: secondo gli osservatori sul treno, i due presidenti hanno firmato contemporaneamente, secondo gli osservatori fermi, il presidente di Avantia ha firmato prima. Eventi simultanei per un gruppo non lo sono per l'altro.

E una conclusione allarmante. Eppure è uno dei piú profondi fatti naturali mai scoperti. Se tra qualche tempo non vi ricorderete piú nulla di questo capitolo, a parte la triste storia del mancato armistizio, avrete comunque introiettato l'idea centrale della relatività. Senza formuloni matematici o ragionamenti astrusi, abbiamo mostrato che questa inaspettata caratteristica del tempo discende direttamente dal fatto che la velocità della luce è costante. Notate, infatti, che se cosí non fosse, cioè se la luce si comportasse come una palla da tennis, tutti sarebbero d'accordo. Gli osservatori fermi sosterrebbero sempre che la luce ha dovuto viaggiare di piú per arrivare al presidente di Indietria, ma questo sarebbe compensato dalla maggiore velocità della luce in quella direzione, che è quella del treno. La stessa cosa per il presidente di Avantia, con la luce piú vicina alla meta ma «frenata» dal treno. Grazie a questo (errato) ragionamento, gli osservatori fermi vedrebbero la luce raggiungere allo stesso tempo i due lati del tavolo. Ma in realtà la luce non può essere né accelerata né frenata e dunque chi è fuori dal treno ha ragione a dire che il presidente di Avantia ha firmato prima.

La costanza della velocità della luce ci porta ad abbandonare l'idea che la simultaneità sia un concetto universale, su cui tutti concordano indipendentemente dallo stato di moto. Non esiste un orologio universale che batta le ore allo stesso istante sulla Terra, su Marte, nella galassia di Andromeda e in ogni altro angolo dell'universo, perché eventi simultanei per certi osservatori non lo sono per altri. Anche in questo caso, l'idea fa a pugni con il sentire comune perché gli effetti non sono praticamente visibili alle velocità consuete. Se il tavolo delle trattative fosse lungo 30 metri e il treno si muovesse a 15 chilometri all'ora, gli osservatori fermi «vedrebbero» la luce arrivare al presidente di Avantia circa un milionesimo di miliardesimo di secondo prima. Certo è una differenza reale, ma è cosí piccola da non poter essere notata dall'occhio umano. Se il treno fosse lanciato a 950 milioni di chilometri all'ora, la luce impiegherebbe (secondo chi sta fermo) 20 volte di piú a raggiungere un presidente rispetto all'altro. Alle altissime velocità, gli effetti della relatività ristretta si cominciano ad apprezzare.

6. L'effetto sul tempo, parte seconda.

E' difficile dare una definizione astratta di tempo: chi ci prova in genere finisce per usare comunque la parola «tempo» o si perde in contorsioni linguistiche per evitare di farlo. Assumiamo allora un punto di vista pragmatico e definiamo il tempo come la quantità misurata da un orologio. Certo, ora dovremmo definire «orologio»; per quanto ci serve qui possiamo pensare a un orologio come a uno strumento che ha un ciclo di moto perfettamente regolare. La misura del tempo sarà data dal numero di cicli fatti dall'orologio nell'intervallo in esame. Un comune orologio da polso soddisfa questa definizione: le sue lancette hanno cicli regolari e il numero dei loro giri (o frazioni di essi) ci serve effettivamente a contare il tempo trascorso tra due eventi dati.

Ovviamente, la frase «ciclo perfettamente regolare » nasconde la nozione di tempo, perché «regolare» è ciò che ha

eguale durata, ciclo dopo ciclo. Da un punto di vista pratico, possiamo aggirare il problema con orologi costruiti con semplici componenti, dai quali ci «aspettiamo » in senso fondamentale - un comportamento ciclico periodico. Gli orologi a pendolo e quelli atomici ne sono un buon esempio, perché si basano entrambi su fenomeni fisici di natura periodica.

Ci prefiggiamo di studiare come il moto influenzi lo scorrere del tempo; data la nostra definizione operativa, dobbiamo allora capire come il moto modifichi i cicli degli orologi. Attenzione: non siamo interessati a cosa facciano le parti meccaniche di un orologio quando sono sollecitate o scosse da un moto irregolare. Studieremo invece il piú tranquillo dei moti , quello uniforme a velocità costante, senza scosse di alcun genere. Cercheremo di rispondere a questa domanda universale: «Qual è l'influenza del moto sullo scorrere del tempo, e cioè sui cicli di ogni pos*sibile* orologio, indipendentemente dalla sua forma e dal suo meccanismo di funzionamento?»

A questo scopo consideriamo l'orologio concettualmente più semplice (e meno pratico) del mondo. E' noto come «orologio a luce » e consiste di due piccoli specchi montati in parallelo e di un fotone di luce che rimbalza in continuazione tra le due superfici (vedi fig, 2.1). Supponendo che la distanza tra gli specchi sia di *15* centimetri, il fotone compie un ciclo completo (andata e ritorno) in circa un miliardesimo di secondo. L'orologio « batte un colpo » ogni volta che il fotone compie un giro completo; quindi se contiamo un miliardo di battiti vuol dire che è passato un secondo.

L'orologio a luce può essere usato come un normale cronometro per misurare l'intervallo di tempo tra due eventi: basta contare il numero dei cicli che avvengono nel frattempo e moltiplicare per la durata di un ciclo; una corsa di cavalli durante la quale l'orologio batte *55* miliardi di volte ha avuto una durata di *55* secondi.

Il motivo per cui utilizziamo questo tipo di orologio è dato proprio dalla sua semplicità, che ci permette di trascurare dettagli estranei al nostro discorso. Possiamo dunque vedere come il moto influisca sul passare del tempo.

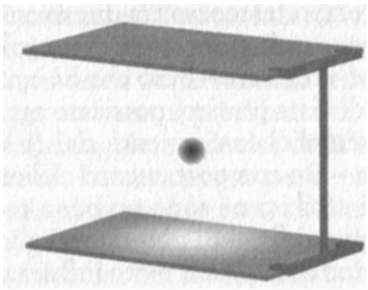

Figura 2. 1.
Un orologio a luce consiste di due specchi paralleli con un fotone che rimbalza da uno specchio all'altro. L'orologio « batte un colpo » ogni volta che il fotone compie un giro completo.

Immaginiamo di stare a guardare un orologio a luce piazzato sul tavolo davanti a noi. Improvvisamente, un secondo orologio ci passa davanti, scivolando via sulla superficie del tavolo a velocità costante (fig. 2.2). Ci chiediamo allora se quest'ultimo stia battendo allo stesso ritmo.

Studiamo il percorso che, secondo la nostra prospettiva, il fotone dell'orologio in moto compie per completare un ciclo. Il fotone parte dallo specchio inferiore e si dirige verso quello superiore. Dal nostro punto di vista, la situazione è quella descritta nella figura 2.3. Questa è l'unica traiettoria possibile per il fotone, che altrimenti non centrerebbe gli specchi e si perderebbe nello spazio; l'orologio in moto ha tutto il diritto di considerarsi fermo dal suo punto di vista, e sa che il fotone colpirà regolarmente gli specchi, quindi il nostro disegno è corretto. Il punto centrale , semplice ma cruciale, di tutto questo è che la traiettoria del fotone in secondo piano per noi è piú lunga di quella percorsa dall'altro fotone: oltre al percorso basso-alto-basso deve anche spostarsi verso destra. Sappiamo che la velocità della luce è costante, dunque il fotone dell'orologio in moto impiegherà piú tempo per compiere un ciclo e batterà piú *lentamente.* Poiché il numero dei battiti riflette la durata di un intervallo, abbiamo appena dimostrato che per l'orologio in moto il tempo scorre piú lentamente.

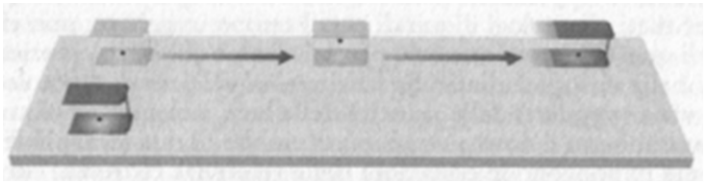
Figura 2.2.
L'orologio a luce in primo piano è in stato di quiete, mentre quello dietro si muove a velocità costante.

Figura 2.3.
Dal nostro punto di vista, il fotone dell'orologio in moto compie un tragitto in diagonale.

Vi potreste chiedere se questo sia un fenomeno peculiare agli orologi a luce, che non appare nei pendoli o nei Rolex da polso. Invece, anche il tempo misurato da questi orologi piú comuni rallenta all'aumentare del moto. E' un'applicazione del principio di relatività. Mettiamo due Rolex sopra gli orologi di prima e ripetiamo l'esperimento. Ovviamente, il Rolex stazionario batterà un secondo ogni miliardo di cicli del suo corrispondente orologio a luce. Ma cosa accade alla coppia in movimento ? Forse il Rolex ritarda anch'esso per sincronizzarsi con l'orologio a cui è legato? Per rendere le cose piú chiare, immaginate che la coppia in movimento sia fissata al pavimento di un vagone piombato in un treno in moto perfettamente uniforme. Per il principio di relatività, un osservatore non può sapere nulla del moto del treno; ma se i due orologi andassero fuori sincronia, l'osservatore avrebbe un'informazione che non gli è permesso di avere (sempre dal principio di relatività). Quindi il Rolex e l'orologio a luce *devono* continuare a misurare gli stessi intervalli di tempo e quindi il Rolex deve ritardare come il suo compagno. L'esperimento può essere ripetuto con ogni possibile marca e tipo: tutti gli orologi in moto relativo tra loro segnano il tempo in maniera diversa.

L'esperienza con l'orologio a luce ci mostra anche che la differenza tra tempo stazionario e tempo in moto dipende dalla distanza aggiuntiva che il fotone in moto orizzontale deve compiere per chiudere un ciclo; e questo dipende a sua volta dalla velocità dell'orologio in moto dal punto di vista dell'osservatore stazionario. Ne segue che un orologio ritarda in proporzione all'aumentare della velocità.
[2] Per chi possiede gli strumenti matematici, notiamo qui che queste osservazioni possono scriversi in forma quantitativa precisa. Ad esempio, se l'orologio si muove con velocità v e il fotone impiega t secondi a compiere un giro completo (secondo la misurazione dell'orologio stazionario), allora la distanza percorsa dall'orologio quando il fotone raggiunge lo specchio inferiore è pari a vt. Grazie al teorema di Pitagora possiamo dire il tratto diagonale nella figura 2.3 è pari a $\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$, dove h è la distanza tra gli specchi. Quindi il percorso totale è $2\sqrt{(Vt/2)^2 + h^2}$. Essendo la velocità della luce una costante indicata di solito con *c*, il fotone impiega $2\sqrt{(Vt/2)^2 + h^2}/c$ secondi per completare il percorso. Abbiamo quindi l'equazione $t = 2\sqrt{(vt/2)^2+h^2}/c$, che risolta in *t* ci fornisce
$t= 2h/\sqrt{c^2 - v^2}$. Per evitare confusioni, ricordando che stiamo parlando dell'orologio in moto, indichiamo il tempo come $tM= 2h/\sqrt{c^2 - v^2}$. Poiché la formula analoga per l'orologio in quiete è $tQ = 2h/c$, abbiamo che $tM = tQ /\sqrt{1-v^2/c^2}$.

Questa relazione ci mostra che il cielo dell'orologio in moto è piú lungo di quello stazionario; in altre parole, nell'intervallo tra due eventi fissi l'orologio in moto batterà meno colpi e quindi per l'osservatore in moto sarà trascorso meno tempo.

Per dare un'idea quantitativa del fenomeno, notiamo che il fotone compie un ciclo in un miliardesimo di secondo. L'orologio deve viaggiare a velocità enormi perché si possa notare qualcosa; a *15* km/h, ad esempio, la distanza percorsa verso destra mentre il fotone completa un ciclo è ridicola - circa mezzo miliardesimo di centimetro - e quindi ha un effetto non apprezzabile sul ritmo dell'orologio in moto. Questo è vero per tutti gli orologi e quindi per il tempo in genere: non ci accorgiamo di questa distorsione solo perché non ne abbiamo esperienze misurabili nella vita quotidiana. Se fossimo a cavalcioni di un orologio che scivola via a tre quarti della velocità della luce, nel giudizio di un osservatore stazionario il nostro tempo scorrerebbe di due terzi piú lento del suo, come impongono le equazioni della relatività ristretta. Un effetto non da poco.

7. Una vita di corsa

Abbiamo appena visto che la costanza della velocità della luce implica che gli orologi in movimento battono piú lentamente di quelli fermi; questo è vero per ogni tipo di orologio e quindi è vero per il tempo in generale: il tempo scorre piú in fretta per un osservatore stazionario rispetto a uno in moto. Se quanto abbiamo dimostrato è giusto, perché allora non potremmo provare a vivere piú a lungo rimanendo perpetuamente in moto? Dopo tutto, non dovrebbe rallentare solo il tempo misurato dagli orologi, ma anche dai battiti del cuore e dal decadimento fisico del corpo. Ebbene è proprio cosí, ed è stato dimostrato di recente - non sugli umani, ma utilizzando le particelle subatomiche dette muoni. C'è però un'importante restrizione, che ci allontana dal sogno dell'eterna giovinezza.

I muoni a riposo in un laboratorio si disintegrano a causa di un processo molto simile al decadimento radioattivo, mostrando un tempo di vita medio di due milionesimi di secondo. Questo è un fatto supportato da prove sperimentali certissime. I poveri muoni vivono la loro breve vita con una pistola alla tempia; dopo due milionesimi di secondo dalla nascita il grilletto scatta e i muoni si scindono in elettroni e neutrini. Ma se gli stessi muoni vengono fatti viaggiare dentro un acceleratore di particelle a velocità di poco inferiori a quelle della luce, la loro vita media misurata dagli scienziati fermi in laboratorio aumenta in modo evidente. Sembra impossibile ma è vero. Al *99,5* per cento della velocità della luce la vita del muone si allunga di dieci volte. La spiegazione ci viene dal principio di relatività: gli «orologi interni» dei muoni in moto sono molto piú lenti di quelli stazionari, e quando per questi ultimi giunge l'ora della fine per i primi è passato meno tempo. Questa è una prova assai diretta ed evidente degli effetti del moto sul tempo. Se un uomo riuscisse a sfrecciare alla stessa velocità, vivrebbe in media *700* anni!

[3] Se l'esperimento compiuto nell'acceleratore di particelle vi sembra troppo esoterico, leggete qui. Nell'ottobre 1971 J. C. Hafele, allora alla Washington University, e Richard Keating, dell'Osservatorio navale statunitense, fecero volare su normali aerei per una quarantina di ore alcuni orologi al cesio. Se prendiamo in considerazione anche gli effetti molto piccoli dovuti alla gravità, la relatività ristretta predice esattamente di quanto gli orologi in volo ritardino rispetto a quelli in moto (si tratta di periodi dell'ordine di pochi decimilionesimi di secondo). I risultati di Hafele e Keating si accordarono perfettamente con le previsioni: il tempo rallenta *davvero* per chi si muove.

Veniamo al rovescio della medaglia. Gli scienziati in laboratorio vedono che i muoni in moto vivono piú di quelli fermi; ma ciò è dovuto al fatto che per i primi il tempo scorre piú lentamente. Questo rallentamento si applica non solo ai loro orologi ma anche a tutte le loro attività. Se per esempio un muone stazionario riesce a leggere al massimo cento libri nella sua breve vita, lo stesso accade al muone in moto, perché anche se la sua vita sembra piú lunga, la sua velocità di lettura - e tutto il resto della sua vita - rallenta allo stesso modo. Dal punto di vista del laboratorio, il muone in moto vive al rallentatore; la sua esistenza si allunga, ma la «quantità di vita » non cambia. Lo stesso si può dire, naturalmente, per gli ipotetici uomini-razzo ultracentenari: dal loro punto di vista, nulla è cambiato. Per noi invece vivono al rallentatore e i loro cicli vitali durano un'enorme quantità del nostro tempo.

8. Ma allora chi si muove?

La relatività del moto è la chiave per capire la teoria di Einstein, ma è anche una potenziale fonte di confusione. Vi sarete accorti che si può rovesciare la prospettiva e scambiare i ruoli dei muoni in moto e di quelli inquiete. Proprio come George e Mildred, entrambe le famiglie hanno lo stesso diritto a proclamare che, dal loro punto di vista, sono fermi, e che sono gli « altri » a muoversi. Quindi potremo concludere che i muoni in moto rispetto al laboratorio vedono gli orologi di quelli in quiete (per noi, che per loro siamo in moto) ritardare. Cioè l'opposto di quanto abbiamo concluso prima.

Ci siamo già imbattuti in una situazione analoga nella storia della firma del trattato regolata dalla lampadina, in cui si giungeva a conclusioni opposte a partire da due punti di vista. Allora eravamo stati costretti dalla relatività ristretta ad abbandonare l'idea che due eventi simultanei siano tali per tutti, indipendentemente dal loro stato di moto. Questo inghippo, però, sembra peggiore: come possono due osservatori diversi sostenere entrambi che l'orologio dell'altro va piú piano del proprio? E com'è possibile che entrambi i gruppi di muoni siano convinti di avere vita piú breve degli «altri »? D'accordo, stiamo scoprendo che il mondo ha delle leggi bizzarre, ma qui stiamo entrando nel campo delle assurdità logiche. Che succede?

Come per tutti i paradossi apparenti sollevati dalla relatività ristretta, risolvere un dilemma logico ci porta a nuove scoperte sui meccanismi che governano l'universo. Per evitare di renderli troppo antropomorfi, lasciamo i muoni e torniamo a George e Mildred, che adesso hanno installato due orologi digitali sulla tuta. George pensa di essere fermo e

vede Mildred, con la sua luce verde e il suo orologio, passargli accanto per poi sparire nell'oscurità cosmica. Nota che l'orologio di lei è piú lento; se fosse piú attento si accorgerebbe che ogni attività di Mildred - il modo di salutare, l'ammiccamento degli occhi e cosí via - sembra rallentata. Dal punto di vista di Mildred, esattamente lo stesso si può dire di George.

Sembra paradossale; cerchiamo però di concepire un esperimento preciso che possa portare a una qualche assurdità logica. Supponiamo che all'incrocio i due regolino i loro orologi esattamente a mezzogiorno. Mentre si allontanano, a entrambi sembra che l'orologio dell'altro ritardi. Per stabilire chi ha ragione, i due si devono ritrovare e confrontare i rispettivi tempi. Ma come si può fare? Beh, ricordiamo che George è dotato di razzi e che può attivarli per raggiungere Mildred. Ma questo altererebbe la simmetria dell'esperimento, perché George lascerebbe il moto uniforme per passare a quello *accelerato,* sottoposto a forze. Se si incontrassero in questo modo, per George sarebbe effettivamente trascorso meno tempo; ma egli potrebbe senz'altro affermare di essere in movimento, perché ne ha sentito gli effetti. Le prospettive non sono piú uguali: accelerando, George ha rinunciato alla sua pretesa di essere in quiete.

Dopo la rincorsa, la differenza tra i due orologi dipenderà dalle velocità relative e da come George usa i razzi. Come sappiamo, al crescere della velocità aumenterà anche la discrepanza. Supponiamo che la velocità relativa dei due quando si incontrano sia il *99,5* per cento di quella della luce e che George aspetti *3* anni, secondo il suo orologio, prima di accendere i razzi che lo portano verso Mildred alla stessa velocità di prima. Quindi George raggiunge Mildred 6 anni dopo il loro primo incontro (secondo l'orologio di George, naturalmente). Secondo le equazioni della relatività ristretta, per Mildred saranno passati 60 anni. Non è poco: la donna dovrà cercare nel profondo della memoria per ricordarsi di quell'incontro tanto remoto. Per George invece sono passati solo 6 anni, il che lo rende - in un senso molto concreto - un viaggiatore nel tempo: ha viaggiato nel futuro di Mildred.

Pretendere di tornare a confrontare gli orologi potrebbe sembrare un sofisma logico, ma è in realtà di importanza vitale. Possiamo cercare di aggirare il problema con qualche trucchetto argomentativo, ma alla fine non ne usciamo. Ad esempio, perché George e Mildred non possono confrontare i loro orologi via telefono o radio? Se una tale comunicazione fosse istantanea, saremmo di fronte a una falla insanabile: per Mildred l'orologio di George è lento, perché le sta comunicando che per lui è passato meno tempo; la stessa cosa accade per George. Non possono avere ragione entrambi: ecco la contraddizione che ci fa capitolare. Ma naturalmente la comunicazione non è istantanea. Il segnale dei telefoni e delle radio è fatto di onde (le onde radio, appunto) che viaggiano alla velocità della luce. Quindi ci vuole del tempo prima che i segnali giungano ai due: proprio il tempo che occorre per rendere i due punti di vista compatibili.

Vediamolo prima dalla prospettiva di George. Supponiamo che allo scoccare di ogni ora egli parli con Mildred al telefono, dicendo «è mezzogiorno e tutto va bene », « è l'una e tutto va bene » e cosí via. Poiché per lui l'orologio di lei è lento, George pensa in un primo tempo che Mildred sentirà i suoi messaggi quando per lei l'ora non è ancora scoccata. Ma poi ci ripensa: « Mildred si sta allontanando, e quindi il segnale che le mando deve percorrere spazi piú grandi per raggiungerla. Forse questo tempo aggiuntivo compensa la lentezza del suo orologio». George si è reso conto che ci sono due fenomeni in competizione (la lentezza dell'orologio di Mildred e il maggior tempo di viaggio del segnale); ispirato, si ferma a calcolare il risultato del loro effetto. Trova che l'aumento del tempo sovrasta il ritardo dell'altro orologio e giunge alla sorprendente conclusione che Mildred riceverà il suo (di lui) segnale *dopo* che l'ora è scoccata per lei. Sapendo che Mildred è una fisica esperta, George pensa che lei terrà conto del tempo di trasmissione del segnale per calcolare la situazione del di lui orologio. Un altro po' di calcoli gli mostra che in ogni caso Mildred concluderà che l'orologio di George è piú lento.

Tutto questo può essere rovesciato e applicato all'altro punto di vista. Mildred pensa in un primo tempo che George riceverà la comunicazione di lei prima di trasmettere la sua; poi si accorge che deve calcolare il tempo di trasmissione e che quindi George riceverà il segnale dopo; infine ipotizza che egli tenga conto del medesimo effetto e conclude che George penserà comunque che l'orologio di Mildred è piú lento.

Se nessuno dei due accelera, i loro punti di vista sono perfettamente equivalenti. Può sembrare un paradosso, ma in questo modo *entram*bi capiscono che ha senso pensare che l'orologio dell'altro sia piú lento.

9. Gli effetti del moto sullo spazio

Abbiamo appena visto che il tempo è influenzato dal moto; non ci vuole molto per immaginare che anche lo spazio ne viene influenzato in modo evidente. Torniamo a Slim e Jim sullo stradone. Slim ha misurato con un metro la lunghezza della sua macchina quando era dal concessionario. Ora, mentre il bolide sfreccia sulla strada, Jim non può usare il metro ma deve utilizzare una misura indiretta. Come abbiamo già visto, può cronometrare il tempo impiegato dalla macchina mentre gli sfreccia davanti e poi moltiplicarlo per la velocità.

Ormai siamo diventati esperti in sottigliezze relativistiche e ci rendiamo conto che dal punto di vista di Slim è Jim a muoversi, e quindi il suo orologio è piú lento. Slim si rende conto che secondo il fratello la macchina sarà piú corta rispetto alla sua misurazione da fermo: se il suo orologio è piú lento misurerà un tempo di passaggio minore, e quindi il risultato della moltiplicazione velocità per tempo sarà minore.

Jim dunque vede la macchina di Slim piú corta quando è in movimento rispetto a quando è ferma. Questo è un esempio di un fenomeno generale: gli osservatori percepiscono gli oggetti in moto come se fossero contratti nella direzione del moto stesso. Le equazioni della relatività ristretta mostrano che, ad esempio, un corpo che si muove al 98 per cento della velocità della luce sembra piú corto dell'80 per cento rispetto alla misura a riposo. La figura 2.4 illustra questo fenomeno

[4] Anche se la figura 2.4 indica correttamente la contrazione di un oggetto nel senso del moto, non mostra proprio ciò che vedremmo se una massa ci passasse accanto con velocità vicina a quella della luce (ammesso che i nostri occhi o apparecchi fotografici fossero così sensibili da vedere qualcosa!) Per «vedere» un oggetto, gli occhi (o l'obiettivo) devono essere colpiti dalla luce riflessa dall'oggetto stesso; ma poiché i fotoni viaggiano verso di noi a partire da diversi punti della superficie, la luce che vediamo ha compiuto percorsi di lunghezze diverse. Il risultato è che l'oggetto ci appare non solo contratto ma anche ruotato.

10. Il moto nello spazio-tempo

Il fatto che la velocità della luce è una costante ci ha portato a modificare radicalmente la visione tradizionale del tempo e dello spazio: non piú strutture rigide e oggettive, ma entità dipendenti dal moto relativo di osservatore e osservato. Potremmo finire qui la nostra trattazione, dopo aver capito che gli oggetti in moto hanno un tempo rallentato e sono piú corti. Ma la relatività ristretta ci fornisce un punto di vista piú avanzato sotto cui unificare questi fenomeni.

Immaginiamo di avere una (scomodissima) automobile che raggiunge subito la velocità di crociera di 150 km/h, ma il cui moto non può piú cambiare finché non spegniamo definitivamente il motore. Slim, la cui reputazione come pilota è sempre piú attestata, deve collaudare il veicolo su una pista rettilinea nel mezzo di un deserto. Poiché la pista è lunga 15 chilometri, Slim dovrebbe impiegare 6 minuti esatti a completarla. Jim, che appare qui come esperto meccanico, controlla i risultati di numerose prove, ed è turbato dal fatto che, sebbene quasi tutte siano durate 6 minuti, le ultime tre hanno fornito tempi piú lunghi: 6,5, *7* e *7,5* minuti. In un primo momento pensa a problemi meccanici, perché quei tempi sembrano indicare che l'auto stava viaggiando a meno di *150* km/h. Ma un esame accurato mostra che è in perfette condizioni. Ne parla allora con Slim, che propone una spiegazione piú semplice. Poiché la pista è orientata da est a ovest, a un certo punto si è trovato ad avere il sole in faccia; nelle ultime tre prove la visibilità era cosí difficile che si è trovato senza accorgersene a percorrere traiettorie diagonali, come è mostrato nella figura 2.5. La spiegazione per l'aumento dei tempi è ora ovvia: a parità di velocità, la maggior distanza da percorrere implica un tempo piú lungo. Detto in altro modo, se non si viaggia perfettamente in direzione est-ovest, una parte dei 150 km/h se ne va in direzione sud-nord, rallentando cosí il tempo di percorrenza

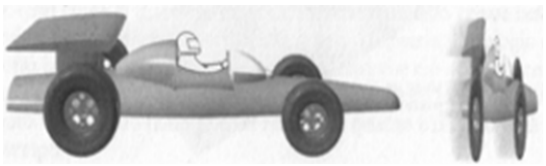

Figura 2.4.
Un oggetto in movimento si accorcia nella direzione del moto

La spiegazione di Slim è assai semplice; ripensiamola in altri termini e verremo portati a compiere un altro salto concettuale. Le direzioni sud-nord e est-ovest sono due dimensioni spaziali indipendenti lungo le quali l'auto si può muovere (c'è anche la dimensione verticale, ad esempio quando si scala un passo montano, ma non ce ne occuperemo qui). La macchina correva sempre a 150 km/h, ma nelle ultime tre corse questa velocità ha dovuto essere distribuita tra le due dimensioni; dunque sembrava andare piú piano lungo la direzione est-ovest.

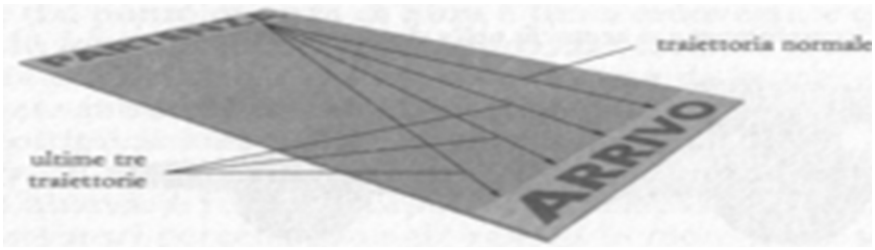

Figura 2.5. A causa del sole radente del tramonto, Slim guida in direzione sempre piú obliqua.

Einstein scoprì che lo stesso concetto - cioè la «ripartizione» del moto tra le varie dimensioni - sta alla base delle strane leggi della relatività ristretta. Basta rendersi conto che il moto può essere ripartito non solo tra le dimensioni spaziali, ma anche in quella *temporale.* In verità, nella maggioranza dei casi, gran parte del moto di un oggetto avviene nella direzione del tempo, non dello spazio. Vediamo cosa significa.

Il moto nello spazio è un concetto intuitivo. Ma pur se di solito non ci pensiamo, sappiamo bene che noi, i nostri amici, i nostri oggetti e cosí via ci muoviamo tutti anche attraverso il tempo. Quando bighelloniamo o guardiamo la televisione, dando un'occhiata ogni tanto a un orologio, ci accorgiamo che il tempo segnato cambia in continuazione, che si « muove in avanti » senza posa. Tutto passa inevitabilmente da un momento nel tempo a un altro. Il matematico Hermann Minkowski prima, e Einstein poi, propugnarono l'idea che il tempo si potesse pensare come un'altra dimensione nell'universo - la quarta - in qualche modo simile alle altre tre spaziali. Sembra un'idea astratta, ma la nozione del tempo come dimensione è in realtà molto concreta. Quando fissiamo un appuntamento comunichiamo a chi dobbiamo incontrare il luogo in cui ci troveremo, ad esempio al nono piano dell'edificio all'angolo tra la Cinquantatreesima e la Settima. I tre numeri (piano 9, strada 53, avenue 7) determinano un particolare punto dello spazio nell'universo. Ma è altrettanto importante stabilire *quando ci* incontreremo, ad esempio alle 15,00. Questo nuovo numero fissa un «punto» del tempo. Gli eventi sono dunque specificati da *quattro* diverse informazioni, tre spaziali e una temporale. Si dice che il punto cosí individuato è un punto dello *spazio-tempo,* per brevità. In questo senso, il tempo non è che un'altra dimensione.

Avendo appena sostenuto che spazio e tempo sono in realtà due diversi tipi di dimensione, possiamo allora parlare della velocità di un oggetto nel tempo, in modo analogo a quanto abbiamo fatto per lo spazio? La risposta è sì.

Il suggerimento su come procedere ci viene da un fatto che abbiamo già visto: quando un oggetto si muove nello spazio relativamente a noi, il suo orologio sembra in ritardo. Detto in altro modo, *la sua velocità nel tempo diminuisce.* Ed ecco la grande idea: secondo Einstein, tutti gli oggetti nell'universo sono *sempre* in moto nello spazio-tempo con una velocità fissa, quella della luce. Questo è davvero strano; siamo abituati a vedere corpi che si muovono molto piú lentamente della luce - l'abbiamo sottolineato piú volte per mostrare perché gli effetti relativistici ci siano cosí poco familiari. Tutto vero, ma qui parliamo della velocità in *quattro* dimensioni, ed è questa velocità in senso generalizzato che è sempre uguale a quella della luce. Per capirci meglio ritorniamo alla macchina a velocità costante dell'esempio precedente. In questo caso, gli oggetti possono distribuire la velocità non lungo due dimensioni, ma lungo quattro - le tre spaziali e la temporale. Un corpo fermo rispetto a noi non si muove nello spazio e quindi (come quando la macchina va diritta) tutta la sua velocità è usata per viaggiare in una sola dimensione, quella del tempo. C'è di piú: tutti gli oggetti in quiete rispetto a noi si muovono nel tempo - cioè invecchiano - alla stessa velocità. Se un corpo si muove rispetto a noi, invece, un po' del suo moto nel tempo deve essere trasferito nello spazio, e quindi la sua velocità nel tempo sarà minore (cosí come la macchina nelle ultime prove è meno veloce nella dimensione est-ovest). Ma questo l'abbiamo visto prima: l'orologio di un oggetto in movimento ritarda. Ora scopriamo che ciò accade perché il moto nello spazio «ruba» un po' di velocità al moto nel tempo.

Anzi: il moto nello spazio non è che un riflesso di quanto è diminuito il moto nel tempo.

[5] Per chi conosce un po' piú di matematica: partendo dal quadrivettore nello spazio-tempo *x = (ct, x1 x2, x3) = (ct,x),* possiamo ricavare il quadrivettore velocità *u = dx/d□,* dove □ è il tempo proprio definito da *d□2 = dt2 - c-2 (dx2.1+ dx2.2+dx2.3*). Allora la «velocità nello spazio-tempo» è la norma del vettore u, cioè *□((c2dt2- dx2) /(dt2- c-2 dx2)),* che è identica a c Riscrivendo la relazione *c2(dt/d□)2 - (dx/d□)2 = c2* otteniamo *c2(d□/dt)2 + ((dx/dt)2 = c2.* Questo mostra che un incremento in velocità, cioè nel fattore *□(dx/dt)2,* deve essere accompagnato da un decremento nel fattore *d□/dt,* cioè nella velocità con cui il tempo scorre nell'orologio solidale con l'oggetto (*d□*) rispetto a quella dell'orologio in quiete *(dt).*

In questo contesto, vediamo subito perché deve esistere una velocità spaziale limite. La massima velocità spaziale possibile si ha quando tutta la velocità dello spazio-tempo è usata nella componente spaziale, cioè quando tutta la velocità nel tempo è convertita in velocità nello spazio. Un simile oggetto usa tutta la sua velocità spazio-temporale (che è pari a quella della luce); di conseguenza questo è un limite invalicabile. (Nell'esempio precedente, è come se l'auto corresse esattamente in direzione nord-sud, stando quindi ferma rispetto alla dimensione est-ovest). Quindi, la luce non ha età, perché non ha velocità temporale. Un fotone uscito dal big bang non è invecchiato di un sol giorno da allora. Alla velocità della luce, il tempo non passa.

11. E la famosa E = mc2?

Einstein non chiamava la sua creatura «teoria della relatività», ma preferiva usare il termine «invarianza», per sottolineare il carattere immutabile della velocità della luce (tra le altre cose). Il significato di «relatività» ci è comunque chiaro, a questo punto. Einstein ha mostrato che spazio e tempo non sono concetti indipendenti e assoluti, ma interdipendenti e relativi. E non si è fermato qui: anche altre proprietà fisiche dell'universo sono sorprendentemente correlate. La sua famosa equazione, che dà il titolo al paragrafo, ne è un esempio tra i piú importanti. Essa mostra che l'energia *E* e la massa m di un corpo non sono indipendenti: possiamo calcolare l'una a partire dall'altra moltiplicando (o dividendo) per un fattore c^2, dove c è la velocità della luce. Massa ed energia, in altre parole, sono convertibili tra loro come lire e dollari ma al contrario delle monete il loro tasso di cambio è fisso. Poiché il fattore di conversione è un numero molto grande, una piccola massa può produrre molta energia. Il mondo si è accorto del terrificante potere di questa equazione quando meno dell'un per cento del chilo di uranio presente nella bomba di Hiroshima si è convertito in energia. Un giorno, con la fusione controllata, potremo forse usare la formula di Einstein per rispondere ai bisogni di energia del mondo intero a partire dalle nostre inesauribili risorse d'acqua di mare.

Dal punto di vista dei concetti di cui abbiamo parlato in questo capitolo, l'equazione di Einstein fornisce una concreta spiegazione al fatto che nulla può superare la velocità della luce. Perché, se riusciamo a spingere un muone fino al *99,5* per cento della velocità della luce, non possiamo spingerlo ancora un po' fino ad arrivare al *99,9,* e poi magari dare un'altra spintarella per superare quota 100 ? Einstein ci spiega perché questo è impossibile. L'energia di un corpo cresce al crescere della sua velocità, e dalla nostra equazione vediamo che all'aumentare della velocità aumenta anche la massa. I muoni che viaggiano al *99,9* per cento della velocità della luce sono molto piú pesanti dei loro omologhi stazionari - circa 22 volte per la precisione (le masse della tabella 1.1 sono tutte calcolate a riposo). Ma piú un corpo diventa pesante, piú è difficile aumentarne la velocità. Spingere un bimbo in bicicletta è un conto spingere un Tir è un altro. Quindi, man mano che il muone accelera, diventa arduo farlo andare ancora piú veloce. A quota *99,999* per cento, la massa è cresciuta di 224 volte; al *99,99999999* per cento di *70.*000 volte. La massa cresce senza limiti all'avvicinarsi della velocità della luce; quindi ci vorrebbe una quantità di energia infinita per raggiungere il 100 per cento. Questo è naturalmente impossibile, e quindi nulla può andare piú veloce della luce.

Come vedremo nel prossimo capitolo, questa affermazione è alla base di un nuovo problema affrontato dai fisici nell'ultimo secolo; ed è anche la campana a morto di un'altra venerabile e acclamata teoria: la gravitazione universale newtoniana.

Capitolo terzo

Curve e pieghe

Grazie alla relatività ristretta Einstein risolse il conflitto tra la «percezione comune» sul moto e il fenomeno della costanza della velocità della luce. In breve, la soluzione è questa: il senso comune è sbagliato, perché si basa su moti che non mostrano la vera natura dello spazio e del tempo perché hanno velocità molto piú lenta di quella della luce. Giocherellare con il comune sentire circa lo spazio e il tempo non fu certo impresa da poco. Einstein si rese conto presto che tra le varie conseguenze della relatività ristretta una era specialmente grave: l'esistenza di una barriera data dalla velocità della luce era incompatibile con la venerabile teoria della gravitazione universale di Newton, risalente alla fine del Seicento. La relatività ristretta risolveva un conflitto e ne causava contemporaneamente un altro. Dopo un decennio di studi intensi e tormentosi, Einstein mise fine anche a questo con la sua teoria della relatività generale, mostrando che il tempo e lo spazio possono piegarsi e distorcersi per trasmettere la forza gravitazionale.

1. La gravità newtoniana.

Isaac Newton (nato nel 1642 nel Lincolnshire, in Inghilterra) cambiò per sempre il modo di fare scienza introducendovi una massiccia dose di matematica, al servizio della ricerca fisica. L'ingegno di Newton era straordinario: quando si accorse che la matematica di cui aveva bisogno per certe sue ricerche non esisteva ancora, se la inventò da solo. Per trovare un altro genio del suo calibro sarebbero dovuti passare quasi tre secoli. Tra tutte le grandi intuizioni di Newton ci concentreremo qui sulla sua teoria della gravitazione universale.

La forza di gravità pervade il nostro mondo quotidiano. Ci tiene ancorati alla superficie terrestre, impedisce che l'aria che respiriamo si perda nello spazio, tiene la Luna in orbita attorno alla Terra e la Terra attorno al Sole. La gravità dà il ritmo alla danza cosmica che milioni e milioni di corpi, dagli asteroidi alle galassie, eseguono senza posa. Ormai diamo per scontato che la gravità sia la sola responsabile di un gran numero di eventi terrestri ed extraterrestri. Ma prima delle scoperte di Newton nessuno immaginava che la forza che fa cadere una mela a terra fosse la stessa che tiene i pianeti in orbita attorno al Sole. Con un'audacia senza pari, Newton riunì la fisica terrestre e quella celeste, proclamando che la forza di gravità era la sola e unica mano invisibile al lavoro nei due regni.

La visione classica della gravità è una grande livellatrice: per Newton *tutto* esercita un'attrazione gravitazionale su *tutto quanto.* Indipendentemente dalla composizione fisica, ogni corpo esercita la forza di gravità e ne è a sua volta soggetto. Newton, studiando attentamente le ricerche di Keplero sui moti planetari, si accorse che la forza di attrazione tra due corpi dipendeva *esattamente* da due fattori: la quantità di materia che li componeva e la loro distanza. La «quantità di materia», che comprende protoni, elettroni e così via, si traduce nel concetto di *massa.* Secondo la teoria della gravitazione newtoniana la forza attrattiva tra due corpi è proporzionale alle loro masse, e decresce al crescere della loro distanza.

Questa affermazione fu precisata quantitativamente da Newton tramite una celebre equazione. Detta a parole, la forza gravitazionale è direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza (si intende di due corpi). Da questa legge di gravità si possono dedurre i moti dei pianeti e delle comete attorno al Sole, della Luna attorno alla Terra e dei razzi interplanetari, cosí come le traiettorie di una palla lanciata in aria o di un atleta che si tuffa dal trampolino. L'accordo tra le previsioni della teoria e i dati sperimentali è straordinario, il che ha fatto trionfare la teoria newtoniana per secoli, fino agli inizi del Novecento. La scoperta della relatività ristretta, però, innalzò ostacoli che la vecchia teoria non sarebbe stata in grado di superare.

2. La gravità newtoniana

non si accorda con la relatività ristretta.

L'esistenza del limite posto dalla velocità della luce è una caratteristica fondamentale della relatività ristretta. E' importante ricordare che questa limitazione vale non solo per gli oggetti materiali, ma anche per segnali e influssi di varia natura: non c'è modo di comunicare informazioni o perturbazioni da un punto a un altro a velocità superiori a quella della luce.

Naturalmente, abbondano casi di trasmissioni *piú lente* della luce: il suono, ad esempio, viaggia nell'aria secca a 331 m/sec, cioè circa 1190 km/h, assai meno dei *300.000* della luce. Questa differenza si può apprezzare durante i temporali: lampi e tuoni si producono simultaneamente, ma il segnale luminoso arriva prima di quello sonoro - diretta conseguenza della discrepanza di velocità. La relatività ristretta ci dice che l'inverso non è possibile: non vedremo mai un segnale giungerci prima della luce che emette. Nessuno batte i fotoni in corsa.

Ecco il problema. Nella teoria newtoniana, la forza gravitazionale esercitata da un corpo su un altro dipende solo dalle masse e dalla distanza, e non ha nulla a che fare con il tempo per cui i due oggetti sono stati in presenza l'uno dell'altro. Questo significa che se cambiasse qualcosa nelle masse o nella distanza, i corpi sentirebbero *istantaneamente* un mutamento della forza gravitazionale. Ad esempio, se il Sole esplodesse improvvisamente, la Terra - situata a circa *144* milioni di chilometri -sarebbe immediatamente scaraventata via dalla sua orbita ellittica. Anche se la luce prodotta dall'esplosione impiegherebbe 8 minuti per giungere a noi, nella teoria newtoniana si sostiene che la «conoscenza» dell'evento si trasmetterebbe istantaneamente alla Terra, tramite un cambiamento nella forza gravitazionale.

Questo è incompatibile con la relatività ristretta, che sostiene invece che nessun tipo di informazione può viaggiare *piú* veloce della luce: la contemporaneità newtoniana è una drastica violazione di questo principio.

Agli albori del Novecento, Einstein si rese conto, dunque, che la sua teoria non si accordava con la riverita e sperimentalmente solida gravitazione newtoniana. Sicuro della verità delle sue scoperte, si mise alla ricerca di una nuova teoria della gravità che fosse compatibile con la relatività ristretta. Questo lo portò a inventare la relatività generale, che portò ad altri straordinari cambiamenti nel modo di intendere spazio e tempo.

3. L'idea piú felice di Einstein.

Anche prima dell'arrivo della relatività ristretta, la teoria di Newton presentava una falla importante. Anche se può essere usata per prevedere in modo assai accurato i moti dei corpi sotto l'influsso della gravità, non ci dice nulla sulla natura di questa forza. Come è possibile che due oggetti separati da milioni di chilometri sentano comunque la presenza l'uno dell'altro? Come fa la gravità a portare a termine questo compito? Newton stesso era consapevole del problema:

E' inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa (senza la mediazione di qualcosa di immateriale) agire e influire su altra materia senza reciproco contatto. [...] Che la gravità sia qualcosa di innato, di inerente ed essenziale alla materia, si che un corpo possa agire a distanza su di un altro attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualche altra cosa in virtù della quale, e per mezzo della quale, l'azione a distanza o la forza possa essere trasportata da un corpo all'altro, è per me un'assurdità cosí grande da farmi credere che nessun uomo il quale abbia una reale consapevolezza nelle materie filosofiche possa mai farla propria. La gravità deve necessariamente essere causata da un agente il quale agisca in modo costante secondo certe leggi; ma se questo agente sia materiale o immateriale è questione che lascio decidere ai lettori.[1]

Isaac Newton, lettera a Richard Bentley, *25* febbraio *1693,* in *The Correspondence of Isaac Newton,* a cura di H.W. Turnbull, J.F. Scott, A.R. Hall e Laura Tilling, *7* voli., Cambridge *1959-77,* vol. *III, pp. 253-54.*

Newton quindi, accettata l'esistenza della gravità, si mise a scrivere le equazioni che ne descrivono accuratamente gli effetti, ma non si prese mai la briga di spiegare il suo effettivo funzionamento. Il suo non era che un «manuale di istruzioni » per l'uso della gravità - un manuale che fisici, astronomi e ingegneri hanno comunque utilizzato con successo per spedire razzi sulla Luna, su Marte e vicino agli altri pianeti, per prevedere le eclissi, per calcolare i moti delle comete e cosí via. Ma la gravità stessa era una «scatola nera», il cui meccanismo interno rimaneva un mistero. Certo, fino a quando

siamo in grado di utilizzare uno strumento non dobbiamo preoccuparci di sapere come funziona; ma se il nostro lettore di CD o il nostro computer si rompono, allora diventa fondamentale sapere cosa c'è dentro per poterlo riparare. Einstein scoprì grazie alla relatività ristretta che la gravitazione newtoniana, nonostante molti secoli di conferme sperimentali, era «rotta » in modo molto subdolo, e che per ripararla bisognava affrontare la questione della vera natura della gravità.

Nel 1907, mentre rimuginava su questi problemi all'ufficio brevetti di Berna, Einstein ebbe un'intuizione fondamentale, che tra alti e bassi l'avrebbe condotto a una nuova teoria: una teoria che non solo avrebbe colmato i buchi di quella newtoniana, ma anche riformulato l'idea stessa di gravità, in modo perfettamente compatibile con la relatività ristretta.

L'idea di Einstein serve a discutere di un problema che potrebbe avervi turbato nel capitolo II. Abbiamo visto che confrontando le osservazioni di due individui che si muovono con velocità costante l'uno rispetto all'altro, possiamo dedurre alcuni fatti straordinari circa il tempo e lo spazio. Ma cosa succede se un osservatore si trova in moto ac*celerato?* Il caso è piú complicato rispetto a quello di un indisturbato moto uniforme, ma possiamo provare a domare la complessità e ad imbrigliare il moto accelerato nella nostra nuova concezione di spazio e tempo.

La piú felice intuizione di Einstein ci mostra come fare. Immaginiamo di essere nel 2050. Siete un famoso esperto di esplosivi che lavora per l'Fbi, e avete appena ricevuto una chiamata concitata riguardo a una bomba supertecnologica che sta minacciando Washington. Arrivato sul posto ed esaminato l'ordigno, vi vengono i brividi: è una bomba termonucleare di tale potenza che anche se fosse seppellita nel profondo della crosta terrestre o sommersa negli oceani sarebbe in grado di causare immani devastazioni. Dopo un esame guardingo dei meccanismi di detonazione, vi rendete conto che non c'è modo di disinnescarla. Anzi, c'è una complicazione in piú: la bomba è posta su una bilancia, e un congegno è pronto a farla esplodere se il peso segnato dovesse variare di piú del 50 per cento. Il timer vi dice che avete una sola settimana. La vita di milioni di uomini è nelle vostre mani. Che fate?

Non c'è che una soluzione: lanciarla nelle profondità dello spazio, dove potrà esplodere senza far danni. Mentre illustrate il vostro piano in una riunione dell'Fbi, il vostro giovane collaboratore Isaac prende la parola. «C'è un grave problema - dice. - Se spediamo tutto quanto nello spazio, il peso della bomba diminuirà, per effetto della minore forza gravitazionale. Quindi il meccanismo di controllo della bilancia farà scoppiare la bomba ben prima che questa arrivi a distanza di sicurezza ». Prima ancora che abbiate il tempo di pensare a cosa rispondere, un altro giovane collaboratore, Albert, si intromette: «A pensarci bene c'è un altro problema ancora, grave come quello sollevato da Isaac: ma piú subdolo. Se permettete ve lo spiego». Vorreste zittire Albert per pensare con calma, ma come al solito non c'è modo di farlo, una volta che è partito in quarta.

«Per lanciare la bomba nello spazio dobbiamo metterla su un razzo. Mentre il razzo accelera per dirigersi verso lo spazio, la bilancia segnerà un peso maggiore di quello attuale e la bomba esploderà comunque. La base dell'ordigno, infatti, eserciterà una maggiore pressione sulla bilancia, proprio come accade quando siamo sballottati indietro in una macchina che sta accelerando: la bomba schiaccerà la bilancia proprio nel modo in cui sentiamo la schiena schiacciarsi contro il sedile. Se il piatto della bilancia viene premuto, naturalmente, questa segnerà un peso maggiore, e se l'aumento è superiore del 50 per cento la bomba esploderà».

Ringraziate Albert per il suo intervento, ma siete convinti che non fa che confermare quello di Isaac: basta un colpo fatale per uccidere un piano, e Isaac ci è senz'altro riuscito. Sentendovi senza vie d'uscita, chiedete al tavolo se qualcuno ha altre idee. Albert ha un'improvvisa illuminazione. «Ripensandoci, forse si può fare. Secondo quanto ci ha detto Isaac, la bilancia segnerà un peso minore per via della diminuzione di gravità; io invece ho sostenuto che l'accelerazione necessaria per far partire il razzo farà segnare un peso maggiore. Quindi, se riusciamo a calcolare con grande precisione l'accelerazione del razzo in ogni istante, questi due effetti si possono cancellare l'uno con l'altro! Nei dettagli, penso che nelle prime fasi del decollo, quando la gravità terrestre è ancora forte, dobbiamo accelerare non di molto, per rimanere nell'intervallo del 50 per cento. Man mano che il razzo si allontana dalla Terra, il peso diminuisce e quindi dobbiamo incrementare l'accelerazione. Se riuscissimo a far sì che in ogni momento i due effetti si equivalessero, allora la bilancia segnerebbe sempre lo stesso peso! »

Le idee di Albert cominciano ad avere un senso. «In altre parole replicate un'accelerazione verticale può produrre un "sostituto" della gravità. Cioè possiamo simulare gli effetti della forza gravitazionale grazie a un moto opportunamente

accelerato».

«Proprio cosí», risponde Albert.

«Quindi è possibile sparare la bomba nello spazio facendo opportuni aggiustamenti dell'accelerazione del razzo, in modo che la bilancia non si sposti fino a quando il tutto è a distanza di sicurezza». Così, giostrando tra gravità e moto accelerato, e grazie alla raffinata astronautica del 2050, riuscite a scongiurare il pericolo.

La connessione tra gravità e moto accelerato è la fondamentale idea che balenò nella mente di Einstein quel felice giorno del 1907 a Berna. La storia della bomba dovrebbe avervi fatto capire l'essenza del concetto, ma forse è utile tornare agli esempi fatti nel capitolo II. Abbiamo visto che se vi trovate in uno scompartimento ferroviario senza finestrini, su un treno in moto uniforme (senza accelerazione), non avete modo di determinare la vostra velocità: anzi, senza riferimenti esterni non ha nemmeno senso parlare di una « vostra velocità ». Se invece il treno sta accelerando, anche se siete privi di altre percezioni sensoriali vi accorgete di una forza che si esercita su di voi. Se ad esempio siete seduti su una poltrona fissata al pavimento in direzione del moto e il treno aumenta la velocità, sentirete lo schienale premervi contro, proprio come nell'esempio di Albert. E se il treno accelerasse verso l'alto sentireste il pavimento premere sui piedi. Einstein capì un fatto fondamentale: se rimanete confinati nello scompartimento, non c'è modo per voi di distinguere tra una situazione di moto accelerato e una in cui compare la forza di gravità. Se i calcoli dell'accelerazione sono precisi, la sensazione che provate sotto i piedi è esattamente quella di stare ben piantati a terra (questo è il trucco che ci è servito per spedire la bomba nello spazio). Analogamente, non saprete dire se la forza che sentite sulla schiena sia dovuta all'accelerazione del treno o al fatto che il vostro schienale è posato orizzontalmente sul terreno. Einstein battezzò questo fatto con il nome di *principio di equivalenza* .[2] Per essere piú precisi, Einstein si rese conto che il principio di equivalenza vale se le osservazioni sono confinate in una porzione abbastanza piccola dello spazio (lo scompartimento dell'esempio). La ragione è la seguente. Il campo gravitazionale varia in forza e direzione da punto a punto. Qui supponiamo che lo scompartimento stia accelerando in modo omogeneo, e quindi stiamo simulando un campo gravitazionale uniforme. Riducendo le dimensioni del sistema, diminuisce lo spazio su cui il campo può variare e quindi il principio di equivalenza è applicabile ancora meglio. Dal punto di vista tecnico, la differenza tra il campo gravitazionale uniforme simulato dall'accelerazione e un campo «vero » non necessariamente uniforme creato da qualche massa è detta campo gravitazionale *di marea* (perché è responsabile, tra l'altro, delle maree terrestri dovute all'azione della Luna). In definitiva, possiamo dire che il campo di marea diventa sempre piú trascurabile al diminuire del nostro scompartimento, e quindi il campo simulato dall'accelerazione diventa indistinguibile da quello «reale».

Da quanto visto fin qui, è chiaro che la relatività generale porta a termine un compito iniziato da quella ristretta. Quest'ultima, grazie al principio di relatività, proclama la democrazia dei punti di vista: le leggi della fisica appaiono identiche a tutti gli osservatori in moto uniforme. E però una democrazia con dei limiti, perché esclude un gran numero di situazioni: quelle in cui il moto è accelerato. L'intuizione di Einstein rimedia a questo difetto e riunisce *tutti i punti* di vista in un unico spirito egualitario. Poiché non c'è differenza tra un osservatore che *non sente il campo gravitazionale* e uno che *non sta accelerando,* possiamo dire che: *tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, possono affermare di essere stazionati, a patto che includano un opportuno campo gravitazionale nella descrizione del loro ambiente.* La relatività generale, dunque, ci assicura che, includendo la gravità, tutti i punti di vista sono legittimi (come vedremo in seguito, ciò implica che gli osservatori in moto accelerato incontrati nel capitolo II - come George all'inseguimento di Mildred - possono essere descritti in modo equivalente introducendo la gravità).

Si tratta certamente di un'intuizione profonda, ma perché Einstein ne era cosí entusiasta? Per dirla semplicemente, perché la gravità è molto misteriosa. E' una forza straordinaria che permea la vita del cosmo, ma è anche sfuggente ed eterea. Il moto accelerato, invece, anche se è un po' piú complicato di quello uniforme, è qualcosa di concreto e tangibile. L'aver trovato un legame tra queste due realtà permise a Einstein di usare ciò che sapeva sull'accelerazione come uno strumento in grado di penetrare nella gravità. Mettere in pratica questa strategia non fu facile, anche per un genio come Einstein, ma alla fine nacque la relatività generale. Per arrivare al successo, Einstein dovette forgiare un altro anello della catena che unisce gravità e moto accelerato: la *curvatura* dello spaziotempo, di cui parleremo ora.

4. Accelerazione e curvatura dello spaziotempo.

Einstein lavorò al problema della gravità con dedizione estrema, quasi ossessivamente. Circa cinque anni dopo la

sua illuminazione bernese, scriveva queste parole al fisico Arnold Sommerfeld: «Sto lavorando esclusivamente al problema della gravità. [...] Una cosa è certa: mai nella mia vita mi sono angosciato tanto come ora. [...] Se paragonata a questo problema, la relatività ristretta non è che un trastullo per bambini ».[3] Albert Einstein, citato in Albrecht Fólsing, *Albert Einstein,* Viking, New York 1997, P. 315.

Pare che la svolta successiva sia avvenuta nel 1912, nell'ambito di una semplice ma profonda conseguenza dell'applicazione della relatività ristretta al principio di equivalenza. Per capire di cosa si tratta è bene concentrarsi - come pare abbia fatto lui - su un tipo particolare di moto accelerato. [4] John Stachel, *Einstein and the rigid1y rotating disk,* in A. Held (a cura di), *General Relativity and Gravitation,* Plenum, New York 198o, p. i.

Per semplicità, tratteremo di un moto in cui il valore della velocità non cambia, mentre cambia invece la direzione di moto. Molti di voi conosceranno una giostra che si trova nei parchi di divertimento, chiamata a volte Tornado o Rotor. Si tratta di un cilindro in veloce rotazione, sulla cui parete interna appoggiano la schiena i partecipanti. E' un moto accelerato, e quindi viene avvertito: vi sentite infatti tirati in direzione opposta al centro della giostra e sentite la parete premere sulla schiena. (Addirittura, anche se questo non è rilevante qui, la forza del moto circolare è tale che se il cilindro viene inclinato le persone non cadono). Se il moto è molto regolare, chiudendo gli occhi potreste quasi avere l'impressione di stare sdraiato per terra. Il «quasi » viene dal fatto che il corpo sente comunque l'attrazione verso il basso della gravità, e non viene imbrogliato del tutto. Ma se la giostra stesse nello spazio, e se la velocità di rotazione fosse calcolata bene, la sensazione sarebbe esattamente quella di giacere sdraiati a letto sulla Terra. E se provaste ad «alzarvi» e a camminare sulle pareti del cilindro, sentireste una pressione sui piedi uguale a quella provata sulla terraferma. I progetti delle stazioni spaziali, infatti, prevedono che in questo modo si possa ricreare una gravità «artificiale» anche nello spazio profondo.

Dopo aver utilizzato il moto accelerato della giostra per simulare la gravità, vediamo (seguendo il ragionamento di Einstein) come appaiono lo spazio e il tempo a chi sta al suo interno. Noi osservatori stazionari siamo in grado di misurare facilmente il raggio e la circonferenza del cilindro in rotazione; ad esempio potremmo usare un righello di lunghezza nota e vedere quante volte il raggio del cilindro lo contiene. Comunque sia, troveremo che il rapporto tra raggio e circonferenza è fisso - pari a 2 (circa 6,28), come ben sappiamo - come per tutti i cerchi disegnati sulla carta. Ma come stanno le cose per chi è all'interno del cilindro?

Chiediamo ai nostri amici Slim e Jim, che guarda caso si stanno proprio divertendo sul Tornado, di fare qualche prova. Lanciamo un righello a Slim, che si mette a misurare la circonferenza, e uno a Jim, che si concentra sul raggio. Per capire cosa succede, diamo uno sguardo dall'alto come nella figura 3. 1. La freccia indica la direzione della rotazione. Non appena Slim si mette all'opera capiamo subito che il suo risultato sarà diverso dal nostro: ci accorgiamo infatti che il suo righello si è *accorciato.* Nulla di misterioso, è la solita contrazione di Lorentz che abbiamo visto nel capitolo II, grazie alla quale un oggetto si contrae nella direzione del moto. Se il suo righello è piú corto, la circonferenza lo conterrà piú volte; quindi la misura finale trovata da Slim sarà *maggiore* della nostra.

Veniamo al raggio. Ci accorgiamo in questo caso che Jim otterrà lo stesso nostro risultato. Il suo righello non è rivolto verso la direzione del moto, come quello di Slim, ma è anzi perpendicolare a questa. Il righello dunque non si contrae affatto, e la sua misura finale è identica alla nostra.

Ora Slim e Jim calcolano il rapporto tra circonferenza e raggio, e trovano un numero maggiore di 2 perché a parità di raggio la circonferenza è aumentata. Che strano! Come è possibile che al mondo esista un cerchio che viola una legge nota già agli antichi Greci, secondo cui il rapporto è *esattamente* 2?

Einstein spiega il fenomeno cosí: il rapporto classico è vero solo per i cerchi disegnati su una superficie piana. Così come gli specchi deformanti di un parco di divertimenti distorcono le consuete relazioni spaziali nelle nostre immagini, cosí una superficie curva modifica le relazioni tra gli enti che vi giacciono sopra; quindi il rapporto tra circonferenza e raggio in generale *non* è 2

Figura 3.1

Il righello di Slim si contrae, perché è posto lungo la direzione del moto; invece il righello di Jim è messo in direzione radiale, perpendicolare a quella del moto, e quindi non subisce variazioni di lunghezza.

Nella figura 3.2 vediamo tre cerchi di raggio identico ma di circonferenza diversa. Quella disegnata sulla sfera (b), ad esempio, è minore di quella sulla superficie piana (a); questo perché la curvatura della sfera fa convergere leggermente le linee radiali del cerchio (ne abbiamo segnate in nero alcune), cosí che la circonferenza risulta contratta. Viceversa, la circonferenza disegnata su una sella (c) è piú lunga di quella in piano; in questo caso la diversa curvatura fa divergere le linee radiali e la circonferenza si dilata. Quindi il rapporto tra raggio e circonferenza sarà rispettivamente minore e maggiore di 2 in (b) e in (c). Stranamente, quest'ultima deviazione dalla formula classica è proprio quella che abbiamo trovato nel caso della giostra rotante. Questo fatto spinse Einstein a ipotizzare che lo spazio fosse curvo, per giustificare la violazione delle « normali» leggi della geometria euclidea. La geometria piana di origine greca, che per secoli è stata insegnata ai ragazzi delle scuole, semplicemente non è piú valida per un osservatore sulla giostra. Il suo spazio di riferimento, invece, è qualcosa di simile a quanto abbiamo disegnato in (c).

[5] L'analisi della giostra, che tecnicamente è detta «rotazione del disco rigido», può ingenerare confusione. In effetti, anche al giorno d'oggi non tutti i fisici concordano su alcuni aspetti piú intricati del problema. Nel testo abbiamo seguito lo spirito delle ricerche di Einstein, e in questa nota continuiamo in questa direzione, chiarendo qualche ulteriore punto. Per prima cosa, vi potreste chiedere come mai la circonferenza del cilindro non si contrae come fa il righello. Tenete presente, però, che nel corso del nostro esempio la giostra era sempre in moto: non l'abbiamo mai studiata in quiete. Quindi, dal nostro punto di vista stazionario, la sola differenza tra le misure di Slim e le nostre è data dalla contrazione del suo righello: la ruota gira sia quando misuriamo noi sia quando misura lui. Poiché ci accorgiamo che il suo righello è piú corto, pensiamo che Slim dovrà usarlo piú volte per coprire la circonferenza, che quindi misurerà di piú di quanto l'abbiamo misurata noi. La contrazione della circonferenza sarebbe rilevante solo se confrontassimo le misure a riposo e in moto, ma di questo non abbiamo bisogno.Ora però potreste chiedervi cosa accadrebbe se la giostra si fermasse. In questo caso sembra proprio che dovremmo aspettarci una diversa misura della circonferenza dovuta alla contrazione di Lorentz. Ma come è possibile, visto che il raggio non cambia? Questo è un problema spinoso, che si risolve pensando al fatto che in realtà i corpi perfettamente rigidi *non esistono.* Gli oggetti si contraggono e si dilatano per rispondere agli sforzi, e compensano le variazioni di lunghezza di cui ci siamo occupati. Se cosí non fosse, come è stato osservato da Einstein medesimo, un disco di metallo fuso posto in rotazione fino al raffreddamento si romperebbe subito alla minima variazione di velocità. Per maggiori dettagli sulla questione, si veda Stachel, *Einstein and the rigid1y rotating disk* cit.

Ricapitolando, Einstein si accorse che le relazioni spaziali della geometria piana (quella che ci è familiare, codificata già dagli antichi Gre*ci) non sono valide* per un osservatore in moto accelerato. Qui abbiamo visto un esempio particolare, ma Einstein mostrò che risultati analoghi si ottengono in tutti i casi possibili di moto accelerato.

In realtà il moto accelerato non fa curvare solo lo spazio, ma anche il tempo (anzi, storicamente Einstein si accorse prima della curvatura temporale).[6] -Il lettore piú esperto si sarà accorto che nell'esempio del Tornado (sistema di riferimento in rotazione uniforme) le sezioni tridimensionali su cui ci siamo concentrati danno luogo a uno spazio quadridimensionale la cui curvatura si annulla comunque.

Non dovremmo sorprenderci troppo di questo fatto, visto che dal capitolo II abbiamo appreso che la relatività ristretta porta a un'unione tra spazio e tempo. Nelle parole di Minkowski, pronunciate a una conferenza nel 1908: «D'ora in poi il tempo e lo spazio da soli diventeranno pallide ombre, e solo una loro unione manterrà la sua indipendenza».[7] -Hermann Minkowski, citato in Fólsing, *Albert Einstein* cit.

In parole povere, ma altrettanto imprecise, la relatività ristretta intreccia spazio e tempo in una struttura unificata, lo spaziotempo, e proclama che «ciò che è vero per lo spazio è vero anche per il tempo ». Ma ci sorge un dubbio: lo spazio curvo riusciamo ad immaginarlo, ma il tempo? Cosa si intende per curvatura del tempo?

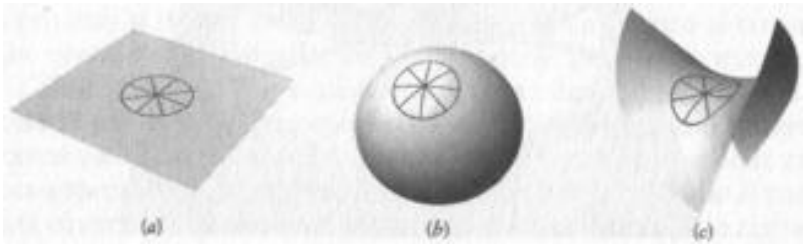

Figura 3.2.

Questi tre cerchi hanno lo stesso raggio, ma quello disegnato su una sfera (b) ha la circonferenza piú piccola rispetto a quello disegnato su un foglio di carta piano (a), che a sua volta ha circonferenza minore di quello disegnato su una sella (c).

Per capire la risposta, torniamo a Slim e Jim e chiediamo loro di fare un altro esperimento. Slim deve stare con la schiena appoggiata alla parete, mentre Jim cercherà di raggiungerlo lentamente, partendo dal centro del cilindro. A ogni metro, Jim sì deve fermare e confrontare il suo orologio con quello del fratello. Che cosa otterranno? Grazie al nostro punto di vista stazionario, dall'alto, siamo in grado di prevedere i risultati: non ci sarà accordo tra i loro orologi. I due, infatti, stanno spostandosi a velocità diverse: all'interno del Tornado, piú si è lontani dal centro e più spazio si deve percorrere per completare un giro; quindi la velocità aumenta con la distanza dal centro. Grazie alla relatività ristretta, sappiamo che la velocità rallenta il tempo e quindi deduciamo che l'orologio di Slim si troverà indietro rispetto a quello di Jim. Inoltre, Jim scoprirà che, man mano che si avvicina al fratello, il suo orologio ritarderà sempre piú (questo perché la sua velocità aumenta).

Ne concludiamo che per gli osservatori sulla giostra il tempo dipende dalla loro esatta posizione - in questo caso dalla distanza dal centro. Ecco un esempio di ciò che intendevamo prima: il tempo è incurvato se il suo passaggio varia da posizione a posizione. Jim, inoltre, si accorgerà di un altro fatto molto importante per il nostro discorso: allontanandosi dal centro sentirà una spinta maggiore verso l'esterno, perché non solo la sua velocità aumenta, ma anche la sua accelerazione. Sulla giostra, dunque, l'aumento dell'accelerazione è legato al ritardo degli orologi, cioè una maggiore accelerazione causa una più pronunciata incurvatura del tempo.

Queste idee fecero compiere a Einstein il passo finale. Dopo aver mostrato che gravità e moto accelerato sono indistinguibili negli effetti, dopo aver visto che il moto accelerato si accompagna alla curvatura dello spazio e del tempo, era finalmente in grado di spiegare i meccanismi interni della «scatola nera»: la gravità è la curvatura *dello spazio e del tempo.* Vediamo che significa.

5. I fondamenti della relatività generale.

Consideriamo una situazione tipica: un pianeta come la Terra in orbita attorno a una stella come il Sole. Per Newton, la stella tiene il pianeta in orbita grazie a un non ben identificato «guinzaglio» gravitazionale, che istantaneamente si propaga a grandi distanze e afferra il pianeta (e viceversa per il laccio che dal pianeta afferra la stella). Secondo Einstein le cose sono diverse. Ci aiuterà a capire la sua teoria un modello visivo e concreto dello spaziotempo che andremo a deformare. Facciamo due semplificazioni: ignoriamo per il momento il tempo e immaginiamo che le dimensioni spaziali siano due e non tre (per semplificare i disegni). Questo è un efficace artificio pedagogico, perché gran parte di ciò che diremo riguardo a questo modello semplificato è applicabile direttamente all'universo reale.

Nella figura 3.3 facciamo tesoro di queste semplificazioni, e rappresentiamo una porzione bidimensionale dell'universo. La griglia che vi abbiamo disegnato è un modo efficace per specificare le posizioni degli oggetti, come la rete stradale in una città come New York. Certo, nel mondo reale, oltre a dire all'incrocio di quali vie ci troviamo dovremmo anche specificare il piano, cioè la dimensione verticale; ma qui, ripetiamo, non ne teniamo conto.

In assenza di materia ed energia, lo spazio per Einstein è *piatto.* Nel nostro caso, questo è proprio quanto accade

nella figura 3.3. Per millenni l'uomo si è raffigurato l'universo in questo modo. Ma che accade in presenza di un oggetto massiccio come il Sole? Prima di Einstein la risposta era semplice: non succede niente, perché lo spazio (e il tempo) non sono che il palcoscenico inerte su cui gli eventi accadono. Quanto abbiamo visto fin qui, seguendo il ragionamento di Einstein, ci porta a conclusioni diverse.

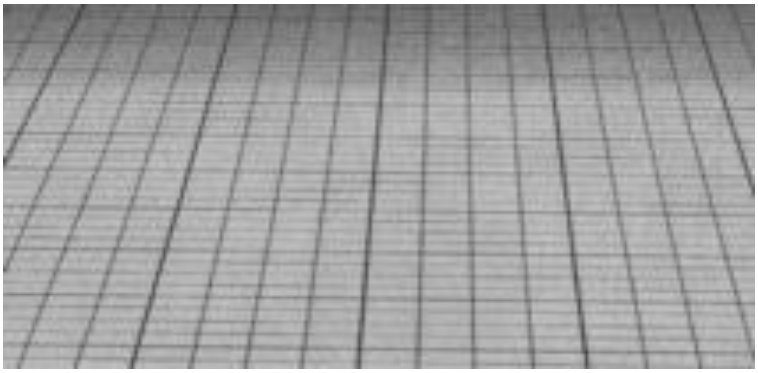

Figura 3.3.
Rappresentazione schematica dello spazio piatto.

Ogni corpo esercita un'attrazione gravitazionale sugli altri. Nella storia della bomba abbiamo visto che la gravità è indistinguibile dal moto accelerato. Con l'esempio del cilindro in rotazione abbiamo imparato che una descrizione matematica accurata del moto accelerato *implica* la curvatura dello spazio. Concludendo la catena di deduzioni, possiamo ipotizzare con Einstein che la presenza di un oggetto massiccio come il Sole *deforma* la struttura dello spazio circostante, come è chiaro nella figura 3.4; secondo un'analogia utile (e assai sfruttata), lo spazio è come una membrana di gomma su cui venga posata una palla pesante. Questa proposta rivoluzionaria ci dice che lo spazio non è una scenografia passiva nell'universo, ma che esso si modifica a seconda della presenza degli oggetti sulla scena.

Questo incurvamento produce un effetto sugli oggetti che si trovano nelle vicinanze del corpo massiccio, visto che ora devono percorrere uno spazio modificato. Tornando all'idea della membrana di gomma, se prendiamo una palla piú piccola e la lasciamo andare con una certa velocità iniziale, il percorso che questa seguirà dipende dalla presenza o meno della palla grossa al centro. Se non c'è e lo spazio è piatto, la pallina seguirà una linea retta; se c'è e lo spazio è incurvato, seguirà una traiettoria curvilinea. Ignorando l'attrito, se diamo alla pallina la velocità iniziale e la direzione opportuna, questa continuerà a muoversi lungo una curva chiusa attorno alla palla, cioè «entrerà in orbita». Già prevediamo cosa accade se abbandoniamo la gomma e torniamo nello spazio.

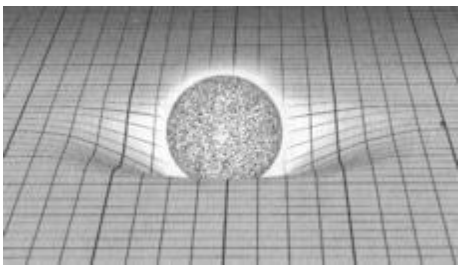

Figura 3.4.
Un corpo massivo come il Sole incurva la trama dello spazio, agendo quasi come una palla pesante posta su un pezzo di gomma

Il Sole, come la palla grande, curva la struttura spaziale della regione che lo circonda, e il moto della Terra, come quello della pallina, è determinato dal tipo di curvatura. Se la velocità e la posizione sono opportune, il pianeta orbiterà attorno alla stella. Questo risultato. descritto nella figura 3.5, non è che il consueto effetto dell'attrazione del Sole sulla

Terra. Ma, al contrario di Newton, Einstein è riuscito a mostrare *il meccanismo* grazie al quale la gravità si trasmette: la curvatura dello spazio. Il guinzaglio gravitazionale che lega la stella e il pianeta non è dovuto a una qualche misteriosa azione a distanza, ma alle modifiche nella trama dello spazio dovute alla presenza della stella.

Questo quadro concettuale getta nuova luce sulle due proprietà caratteristiche della gravità. In primo luogo, piú il corpo è pesante, maggiore sarà la distorsione spaziale da lui causata; e questo è in accordo con la legge di gravità, secondo cui la forza è direttamente proporzionale alla massa. Secondariamente, la distorsione diminuisce se ci allontaniamo dal corpo che l' ha causata; di nuovo, c'è accordo con la legge secondo cui la forza è inversamente proporzionale alla distanza.

E importante notare che anche il corpo piú piccolo nei sistemi che abbiamo visto (Sole-Terra) deforma lo spazio, anche se molto meno di quello piú massiccio. Ecco come, ad esempio, la Terra mantiene la Luna in orbita, e come ci mantiene ben saldi sulla sua superficie. Un paracadutista in caduta libera sta in realtà «scivolando» all'interno di una depressione dello spazio causata dalla massa del pianeta. Anche noi, a nostra volta - come tutti i corpi dotati di massa - incurviamo lo spazio intorno a noi, ma la nostra azione è quasi impercettibile.

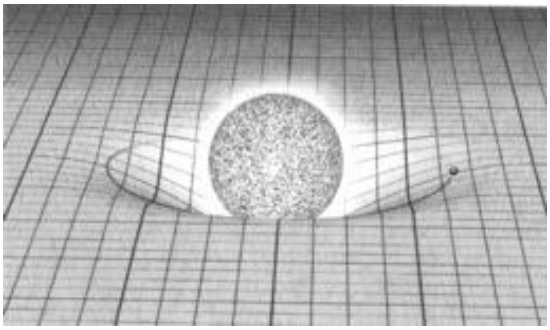

Figura 3.5.
La Terra orbita attorno al Sole «rotolando» in un avvallamento dello spazio causato da quest'ultimo. Piú precisamente, il nostro pianeta segue una traiettoria di «minima energia» nella regione di distorsione attorno al Sole.

Concludendo, Einstein era perfettamente d'accordo con Newton sul fatto che «la gravità deve necessariamente essere causata da un agente», e accettò la sfida lanciata da quest'ultimo a proposito della natura sua «materiale o immateriale ». L'agente della gravità, per Einstein, è la trama stessa del cosmo.

6. Qualche avvertenza per l'uso.

L'analogia con la membrana di gomma è utile perché ci fornisce un'immagine visiva e tangibile di ciò che si intende per una curva, una increspatura nella trama spaziale dell'universo. Gli scienziati fanno spesso uso di questi artifici per guidare la loro intuizione riguardo ai concetti di gravità e curvatura. Ciò nonostante, l'analogia non è perfetta, ed è bene soffermarsi su qualche suo difetto.

Innanzitutto, quando il Sole incurva lo spazio attorno a sé non è «tirato in basso» dalla gravità come la palla sulla membrana; nello spazio non c'è nulla che possa «tirare ». Ciò che Einstein ci ha insegnato è che questa curvatura non è *causata* dalla gravità, ma è la gravità. Similmente, la Terra non resta in orbita perché una qualche spinta gravitazionale esterna la guida lungo gli avvallamenti dello spazio. La sua traiettoria, invece, è determinata da questo: Einstein ha mostrato che i corpi si muovono nello spaziotempo lungo i percorsi « piú facili possibili », cioè quelli che rendono minima l'energia spesa. In uno spazio curvo, anche le traiettorie minimali sono incurvate. Quindi, la membrana di gomma ci fornisce una buona rappresentazione visiva di cosa succede quando lo spazio è distorto da una massa, ma è fuorviante per quel che riguarda i meccanismi fisici di queste distorsioni. Il modello ci spinge a considerazioni newtoniane tradizionali (la gravità che «tira»), mentre nella realtà dobbiamo riformulare la gravità in termini nuovi, di curvatura dello spazio.

La membrana, poi, è bidimensionale. Anche se è difficile immaginarselo, nella realtà i corpi massicci incurvano tutto lo spazio tridimensionale attorno a loro. Nella figura 3.6 tentiamo di mostrare questo fatto in modo approssimato: in

realtà tutto o spazio attorno al Sole è deformato, e la figura non ne mostra che una piccola parte. Un corpo come la Terra viaggia *nello* spazio tridimensionale curvato dal Sole. Questo può sembrarvi strano: come fa la Terra a non sbattere contro il muro «verticale» della figura? Abbandoniamo l'idea e a membrana: lo spazio non e una barriera solida . Le griglie disegnate in figura non sono che due fette sottili dello spazio in cui tutto è immerso ed è libero di muoversi. Forse questa risposta non vi fa sentire meglio: perché non riusciamo a sentire lo spazio? Ma in realtà lo sentiamo: ci accorgiamo della gravità, e lo spazio è il mezzo che trasmette la forza gravitazionale. Come ama ripetere il grande fisico John Wheeler, « la massa tiene in pugno lo spazio dicendogli come curvarsi, lo spazio tiene in pugno la massa dicendole come muoversi».[8] - Conversazione con John Wheeler, 27 gennaio 1998.

Un'altra debolezza dell'analogia è la soppressione del tempo. L'abbiamo fatto per amore di chiarezza, perché nonostante quello che ci dice la relatività ristretta sull'equivalenza tra le dimensioni spaziali e quella temporale, il tempo è molto piú difficile da «vedere». Ma come abbiamo visto nell'esempio del cilindro in rotazione, l'accelerazione - e dunque la gravità - curva sia lo spazio sia il tempo. (Anzi, le equazioni della relatività generale mostrano che nel caso di corpi relativamente lenti, come la Terra in orbita attorno al Sole, la curvatura temporale è molto piú importante di quella spaziale). Ritorneremo sull'argomento tra due paragrafi.

Con queste tre avvertenze assai importanti, che è bene tenere a mente, possiamo comunque tranquillamente pensare al modello della membrana di gomma come a un'accettabile rappresentazione intuitiva della teoria di Einstein.

7. Il conflitto è risolto.

Einstein riuscì dunque a spiegare come funziona la gravità. Ci poniamo ora una domanda fondamentale: la riformulazione einsteiniana risolve le incompatibilità con la relatività ristretta che affliggono la teoria newtoniana? La risposta è affermativa. Ritorniamo al nostro modello della membrana di gomma. Immaginiamo di avere una pallina che rotola in linea retta sulla superficie, in assenza di altre palle. Nel momento in cui mettiamo la palla, questa azione influenza sì il moto della pallina, ma non istantaneamente: se filmassimo la sequenza degli eventi per rivedere il tutto al rallentatore ci accorgeremmo che la perturbazione provocata dalla massa grande si propaga come le increspature sulla superficie di un lago, per poi raggiungere la pallina dopo un certo tempo. Dopo qualche istante le oscillazioni transitorie legate a questa perturbazione cessano, e la membrana rimane incurvata e statica.

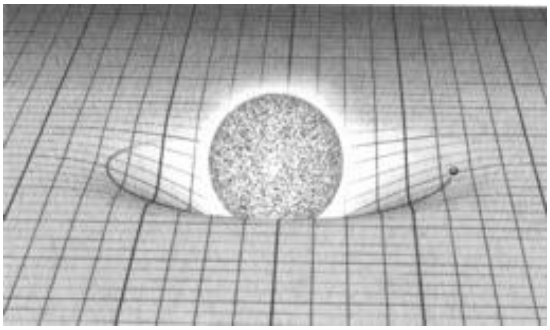

Figura 3.6. Un campione dello spazio tridimensionale attorno al Sole.

Lo stesso accade nel cosmo. In assenza di masse lo spazio è piatto e un corpo di piccola massa può starsene felicemente fermo o viaggiare a velocità costante. Se un oggetto massiccio irrompe sulla scena lo spazio si altera, ma, come nel caso della membrana, la distorsione non è istantanea: si propagherà a partire dal nuovo corpo fino a stabilizzarsi in una curvatura spaziale che trasmette l'attrazione gravitazionale. Nel nostro modellino le increspature viaggiano a una certa velocità che dipende dal materiale di cui è fatta la membrana; nel caso generale, Einstein riuscì, a calcolare che le perturbazioni si propagano esattamente alla velocità *della luce.* Quindi, ad esempio, nel caso dell'esplosione del Sole esaminato prima avremo che la Terra non si accorgerà istantaneamente del cambiamento. Invece, quando un corpo cambia posizione (o scompare) esso causa una distorsione dello spaziotempo che si propaga alla velocità della luce, non violando cosí il principio della massima velocità possibile: la Terra, dunque, sentirà la mancanza del Sole nel momento

stesso in cui ne vedrà la prova della distruzione (circa otto minuti dopo l'esplosione). La formulazione di Einstein risolve il conflitto tra gravità e relatività ristretta: l'influsso gravitazionale sta al passo dei fotoni, ma non li supera.

8. Uno sguardo a curvatura e tempo.

Le figure 3.2, 3.4 e 3.6 illustrano l'essenza del concetto di «spazio incurvato ». Esistono immagini analoghe che tentano di illustrare l'idea del «tempo incurvato», ma sono assai piú difficili da decifrare, e quindi non le presenteremo qui. Esaminiamo di nuovo, invece, con attenzione l'esempio dei nostri Slim e Jim alle prese con la giostra rotante, per cercare di capire cosa sia l'esperienza del tempo incurvato a causa della gravità.

A questo scopo, è meglio ritornare a George e Mildred, che ora non fluttuano piú nelle profondità del cosmo ma stazionano ai bordi del sistema solare. Entrambi indossano le loro tute e sono dotati di orologi identici, inizialmente sincronizzati. Per semplificarci le cose, ignoriamo gli effetti dei pianeti e concentriamoci sul Sole. Ora immaginiamo che un'astronave si avvicini ai due; è una strana astronave che porta con sé un cavo la cui estremità è fissata vicino alla superficie solare. George usa il cavo per calarsi lentamente verso il Sole; di tanto in tanto si ferma a confrontare il suo orologio con quello di Mildred. Per effetto della curvatura del tempo prevista da Einstein, l'orologio di George ritarderà sempre di piú rispetto a quello di Mildred man mano che il campo gravitazionale cresce di intensità, cioè man mano che egli si avvicina al Sole. E' in questo senso che la gravità distorce il tempo.

Osserviamo che, contrariamente alla situazione descritta nel capitolo II, qui non c'è simmetria tra i nostri due eroi. George, a differenza di Mildred, *sente* la forza gravitazionale diventare sempre piú intensa, perché deve tenersi al cavo sempre piú saldamente per non cadere verso il Sole. Entrambi sono d'accordo nell'affermare che l'orologio di George ritarda, e non esiste un'altra «prospettiva ugualmente valida» che scambi i loro ruoli e rovesci le conclusioni. E' quello che abbiamo già visto nel capitolo II, quando George ha acceso i razzi per raggiungere Mildred. L'accelerazione da lui sentita si rifletteva nel fatto che il suo orologio era piú lento di quello di Mildred. Poiché ora sappiamo che una accelerazione equivale a una forza gravitazionale, ci accorgiamo che la storia di George e del cavo è fondata sullo stesso principio.

In un campo gravitazionale come quello presente vicino a una stella media come il Sole, l'effetto di ritardo degli orologi è assai piccolo. Se Mildred stesse a 1,5 miliardi di chilometri dal Sole e George in prossimità della superficie, il ritmo dell'orologio di quest'ultimo sarebbe pari al 99,9998 per cento dell'altro: davvero poco.[9] -Gli orologi atomici a nostra disposizione sono comunque in grado di rilevare queste piccole discrepanze. Nel 1976, ad esempio, Robert Vessot e Martin Levine, dello Harvard Smithsonian Astrophysical Observatory, insieme con altri scienziati della Nasa, lanciarono un razzo Scout D con a bordo un orologio atomico con un margine di errore di soli 10-12 secondi per ora. Il loro scopo era dimostrare che al crescere dell'altitudine (e quindi al decrescere della forza gravitazionale) l'orologio in volo avrebbe accelerato rispetto a uno identico sulla Terra (o meglio, che quest'ultimo, soggetto alla gravità, avrebbe ritardato). Grazie a un sistema bi-direzionale di segnali a microonde, i ricercatori poterono confrontare i due apparati, trovando che all'altezza massima di 9.600 metri l'orologio in volo era piú veloce di 4 x 10-9 volte, in accordo con le previsioni teoriche al 99,99 per cento.

Se al posto del Sole ci fosse una stella di neutroni la cui densità è milioni di miliardi di volte maggiore, il ritmo dell'orologio di George sarebbe circa uguale al 76 per cento di quello dell'orologio di Mildred. Campi piú intensi, come quelli attorno ai buchi neri (di cui parleremo tra poco), rallentano ancora di piú lo scorrere del tempo, provocando distorsioni temporali molto accentuate.

9. Le prove sperimentali della relatività generale.

Chi si accosta allo studio della relatività generale è soprattutto colpito dalla sua eleganza. Rimpiazzando la fredda e statica visione newtoniana con una descrizione geometrica e dinamica dello spaziotempo, Einstein è riuscito a rendere la gravità parte della trama dell'universo. La gravità, cioè, non viene imposta dall'alto come una sovrastruttura, ma è parte della struttura intima del cosmo. Insufflando la vita nello spaziotempo, rendendolo libero di piegarsi e incurvarsi, otteniamo quel fenomeno che chiamiamo comunemente gravità.

Considerazioni estetiche a parte, una teoria fisica deve essere in grado di fare previsioni e di spiegare con precisione i fenomeni a cui si riferisce. La teoria newtoniana ha passato l'esame a pieni voti fino all'inizio del Novecento. Che la si applichi a mele cadute, palle lanciate da torri pendenti, comete orbitanti attorno al Sole o orbite planetarie, la gravitazione classica fornisce spiegazioni assai precise dei fenomeni e fa previsioni che sono state verificate innumerevoli volte in svariate situazioni. Se Einstein osò mettere in discussione questi trionfi sperimentali - l'abbiamo già detto piú volte - fu per colpa dell'idea di trasmissione istantanea della forza, che cozzava contro la relatività ristretta.

Cosí come gli effetti relativistici, seppur importantissimi per la nostra concezione del mondo, sono quasi inesistenti nella vita di tutti i giorni, lo stesso accade per le deviazioni tra la teoria einsteiniana e quella newtoniana. Questa è una buona e una cattiva notizia. E' buona perché se una teoria ha l'ambizione di soppiantarne un'altra ben verificata sperimentalmente, è meglio che le si avvicini molto in tutte le situazioni in cui la vecchia ha già trionfato. Ma è anche cattiva, perché rende piú difficile decidere sperimentalmente quale delle due sia giusta. Distinguere le previsioni di Newton da quelle di Einstein richiede misure estremamente precise ed esperimenti molto sensibili alle possibili discrepanze. Se calcoliamo la traiettoria di una pallina da tennis secondo le due teorie, i risultati saranno diversi, ma in modo cosí marginale che è impossibile verificare sperimentalmente chi ha ragione. Bisogna escogitare esperimenti piú ingegnosi; Einstein ne propose uno.[10] - A metà dell'Ottocento il francese Urbain-Jean-Joseph Le Verrier scoprì una lieve deviazione del pianeta Mercurio rispetto all'orbita predetta dalla teoria newtoniana («la «precessione del perielio» di Mercurio, come è nota in termini tecnici). Per mezzo secolo si proposero varie soluzioni - l'influenza di un pianeta o di un satellite ignoti, della polvere interstellare o dello schiacciamento ai poli del Sole - nessuna delle quali era soddisfacente. Nel 1915 Einstein calcolò la precessione del perielio di Mercurio con le sue equazioni nuove di zecca della relatività generale, e trovò una soluzione che - per sua stessa ammissione - gli fece palpitare il cuore: era esattamente in accordo con le osservazioni. Questo trionfo fu importante per dargli fiducia, anche se tutti gli altri scienziati si aspettavano dalla teoria delle *previsioni,* piuttosto che spiegazioni di anomalie note. Per i dettagli, si veda Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein,* Oxford University Press, Oxford 1982, pp. 253 sgg. [trad. it. *«Sottile è il Signore ... ». La vita e la scienza di Albert Einstein,* Bollati Boringhieri, Torino 1986, pp. 276 sgg.].

Le stelle si vedono solo di notte, ma ovviamente sono lì in cielo anche di giorno; non le distinguiamo solo perché la loro luce fioca e distante è travolta dalla potenza della radiazione solare. Durante un'eclisse di Sole, però, la Luna oscura temporaneamente la luce solare, e le stelle diventano visibili. La presenza della nostra stella ha comunque un effetto. La luce proveniente dalle stelle lontane deve passare vicino al Sole per raggiungerci; secondo la relatività generale la massa solare incurva lo spazio circostante, e questa distorsione *avrà effetto sulla traiettoria della luce stellare.* Dopo tutto, i fotoni viaggiano nello spaziotempo: se questo è curvato, il loro moto ne subirà le conseguenze come quello di un altro oggetto. La deviazione dei raggi stellari è apprezzabile nei casi in cui questi passano molto vicini al Sole nel loro cammino; un'eclisse ci rende in grado di osservare questi segnali luminosi senza che siano oscurati dalla luce diurna.

L'angolo di deviazione della luce stellare si può misurare in questo modo. La deviazione provoca uno spostamento nella posizione *apparente* della stella; questa può essere confrontata con quella *reale,* determinata con osservazioni notturne (senza l'ingombrante presenza del Sole) fatte quando la Terra è in una certa posizione - circa sei mesi prima o dopo l'eclisse. Nel novembre 1915, Einstein utilizzò le equazioni della sua teoria per calcolare che l'angolo avrebbe dovuto essere di circa 0,00049 gradi (precisamente *1,75* arcosecondi, dove un arcosecondo è *1/3600* di grado). E un angolo molto piccolo, uguale a quello sotto cui vedremmo una moneta da cinquanta lire a tre chilometri di distanza. Ma la sua misurazione era comunque alla portata della tecnologia di allora. Sotto la spinta di Sir Frank Dyson, direttore dell'osservatorio di Greenwich, il noto astronomo Sir Arthur Eddington, segretario della Royal Astronomical Society, organizzò una spedizione sull'isola di Principe, al largo dell'Africa occidentale, per verificare la previsione di Einstein durante l'eclisse del 29 maggio 1919.

Il 6 novembre dello stesso anno, dopo cinque mesi di analisi delle fotografie scattate a Principe durante l'eclisse (e di altre ottenute da un'altra spedizione inglese a Sobral, in Brasile, guidata da Charles Davidson e Andrew Crommelin), fu annunciato in una seduta congiunta della Royal Society e della Royal Astronomical Society che le previsioni di Einstein basate sulla relatività generale erano state confermate. La notizia di questo successo -che comportava una totale rivoluzione nella concezione di spazio e tempo -si sparse rapidamente ben oltre i confini della comunità scientifica. Il *7* novembre 1919 il « Times » di Londra titolò a tutta pagina: « Rivoluzione nella scienza - Una nuova teoria dell'universo - Rovesciate le idee di Newton».[11] - Robert P. Crease e Charles C. Mann, *The Second Creation,* Rutgers University Press, New Brunswick (N. J.) 1996, P. 39. Einstein divenne una celebrità.

Negli anni seguenti, l'operato di Eddington fu passato al setaccio. Molti tecnicismi e sofisticazioni rendevano l'esperimento difficile da replicare, e questo fece nascere qualche dubbio sull'affidabilità della misura. Comunque, negli ultimi quarant'anni ci si è potuti avvantaggiare dei miglioramenti tecnologici per confermare molti aspetti della relatività generale con grande precisione. L'idea einsteiniana di gravità è a giudizio universale compatibile con la relatività ristretta, e sappiamo che fornisce previsioni migliori di alcuni risultati sperimentali rispetto a quella newtoniana.

10. I buchi neri, il big bang e l'espansione dello spazio.

Mentre la relatività ristretta si manifesta soprattutto alle alte velocità, quella generale sale in cattedra in presenza di grandi masse e quindi grandi distorsioni dello spaziotempo. Vediamo due esempi.

Il primo parte da una scoperta dell'astronomo tedesco Karl Schwarzschild. Nel *1916,* mentre si trovava a dover calcolare gli alzi dei cannoni sul fronte russo, si mise a studiare la neonata relatività generale. Incredibilmente, pochi mesi dopo l'articolo di Einstein, Schwarzschild fu in grado di utilizzare la teoria per determinare esattamente la curvatura dello spaziotempo in prossimità di una stella perfettamente sferica. Egli spedì i suoi calcoli a Einstein, che li presentò a nome del collega lontano all'Accademia prussiana delle scienze.

Oltre a rendere matematicamente precisa la situazione illustrata nella figura *3.5,* la cosiddetta « soluzione di Schwarzschild» mostrava una conseguenza sorprendente della relatività generale. Se la massa di una stella è concentrata in una regione abbastanza piccola (in modo che il rapporto tra massa e raggio sia superiore a un certo valore critico), la distorsione spaziotemporale che ne consegue è cosí pronunciata che tutto ciò che capita nei dintorni della stella - luce inclusa - non riesce a sfuggire alla sua morsa gravitazionale. Proprio perché nemmeno la luce può uscire da queste stelle «compresse», furono in un primo tempo chiamate *stelle oscure o congelate.* Un nome migliore fu poi trovato anni dopo da John Wheeler, che le battezzò *buchi neri:* «buchi» perché tutto ciò che vi si avvicina vi cade dentro, «neri» perché non emettono luce. Il nome divenne famoso.

La soluzione di Schwarzschild è illustrata nella figura *3.7.* Anche se i buchi neri hanno una pessima fama, un corpo che passa a «distanza di sicurezza» non ha nulla da temere, perché viene deviato proprio come accadrebbe vicino a una normale stella. Ma gli oggetti che si avvicinano troppo, oltre un limite chiamato *orizzonte degli eventi* del buco nero, sono spacciati: vengono trascinati inesorabilmente verso il centro e sottoposti a una forza gravitazionale enorme che alla fine li distrugge, Se vi tuffaste a piedi in avanti oltre l'orizzonte degli eventi, vi sentireste subito molto strani. La forza gravitazionale del buco nero cresce cosí in fretta che il suo effetto sui vostri piedi sarebbe assai maggiore rispetto a quello sulla testa: in pochi attimi sareste dilaniati.

Se invece vi manteneste prudentemente ai bordi dell'orizzonte degli eventi, potreste compiere un'impresa straordinaria. Immaginate di imbattervi in un buco nero la cui massa è, ad esempio, 1.000 volte quella del Sole, e di calarvi con un cavo (come il buon vecchio George) fino a pochi centimetri sopra l'orizzonte degli eventi. Sappiamo che la gravità causa una curvatura del tempo, che quindi per voi passerebbe piú lentamente - molto piú lentamente, vista l'incredibile forza gravitazionale dei buchi neri. Il vostro tempo rallenterebbe circa diecimila volte rispetto a quello dei vostri amici rimasti sulla Terra. Se vi trastullaste in questo modo attorno al buco nero per un anno (un vostro anno) prima di risalire sull'astronave e tornare a casa, all'arrivo sulla Terra scoprireste che sono passati piú di diecimila anni dalla vostra partenza. Avete dunque usato il buco nero come una macchina del tempo, che vi ha proiettato nel futuro remoto del nostro pianeta.

Per farsi un'idea delle grandezze in gioco, pensate che il Sole diventerebbe un buco nero se il suo raggio passasse dai 720.000 chilometri reali a circa 3! Provate a immaginarlo: tutto il Sole starebbe comodamente nei confini di una città come Roma; un cucchiaino di questa nuova stella peserebbe quanto l'Everest. Per rendere la Terra un buco nero, invece, dovremmo comprimerla fino a una sfera di raggio pari a un centimetro circa. Per molto tempo si è rimasti scettici sul fatto che fenomeni del genere potessero davvero accadere in natura; molti scienziati erano convinti che i buchi neri non fossero che il parto dell'immaginazione sovreccitata di un teorico.

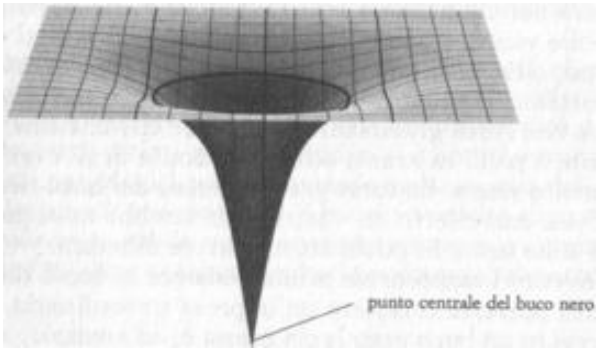

Figura 3.7.

Un buco nero piega lo spaziotempo in modo cosí pronunciato che tutto ciò che arriva all'interno del suo «orizzonte degli eventi» (il cerchio nero in figura) non può sfuggire alla sua morsa gravitazionale. Nessuno sa cosa accade di preciso nel punto centrale di un buco nero.

Ma negli ultimi dieci anni si sono accumulate prove sperimentali sempre piú convincenti dell'esistenza dei buchi neri. Ovviamente non possono essere osservati direttamente con un telescopio, perché sono neri; bisogna invece scandagliare il cielo alla ricerca di comportamenti anomali di stelle ordinarie che potrebbero essere vicine all'orizzonte degli eventi di un buco nero. Ad esempio, la polvere e i gas emessi dagli strati superficiali di queste stelle potrebbero cadere oltre l'orizzonte ed essere accelerati fino a velocità prossime a quelle della luce. A simili velocità gli attriti interni all'enorme gorgo di materia che precipita nel buco nero generano una quantità enorme di calore, che fa sì che il pulviscolo stellare brilli, emettendo luce visibile e raggi X. Poiché questa radiazione si produce fuori dell'orizzonte degli eventi, sfugge al buco nero e può essere osservata anche da noi. La relatività generale fa previsioni dettagliate sulle proprietà di queste emissioni; osservare un simile fenomeno è dunque una prova convincente, quantunque indiretta, dell'esistenza di un buco nero. Ad esempio, ci sono forti indizi del fatto che ce n'è uno molto grande (2,5 milioni di volte il Sole) nel bel mezzo della Via Lattea, la nostra galassia. E questo mostro svanisce in confronto a quelli che si pensa stiano nel nucleo di certe quasar straordinariamente luminose: si parla di miliardi di masse solari.

Schwarzschild morì pochi mesi dopo aver trovato la sua soluzione, a soli quarantadue anni, a causa di una malattia della pelle contratta al fronte. Il suo incontro con la teoria della gravitazione di Einstein, tragicamente breve, ci ha svelato uno dei piú sorprendenti e misteriosi fenomeni del mondo naturale.

Il secondo caso in cui la relatività generale mostra tutte le sue potenzialità ha a che fare con la nascita e l'evoluzione dell'intero universo. Come abbiamo visto, Einstein mostrò che spazio e tempo reagiscono alla presenza di massa ed energia e che la distorsione risultante si riflette sui moti dei corpi vicini. A sua volta, il modo con cui questi corpi si muovono, in virtù della loro massa ed energia, ha un effetto ulteriore sulla curvatura dello spaziotempo, e cosí via, Grazie alle equazioni della relatività generale -equazioni basate sulle geniali intuizioni geometriche del grande matematico dell'Ottocento Georg Bernhard Riemann, su cui ritorneremo - Einstein diede una forma quantitativa a questa eterna danza di spazio, tempo e materia. Fu il primo a sorprendersi, però, quando si accorse che cercando di applicare le equazioni all'intero universo, e non solo a un sistema isolato quale un pianeta in orbita attorno a una stella, si giungeva a una conclusione incredibile: la forma *complessiva dell'universo spaziale deve cambiare nel tempo.* Il cosmo si sta espandendo o contraendo, le equazioni della relatività generale gli impediscono di stare fermo.

Questo era troppo anche per Einstein. Aveva già strapazzato il senso comune riguardo alla percezione del tempo e dello spazio, ma l'idea di un universo eterno e immutabile era troppo radicata anche in un rivoluzionario come lui. Per questo motivo, Einstein ritoccò le equazioni introducendo un termine detto costante cosmologica, che aggiustava le cose e portava a un rassicurante universo stazionario. Ma dodici anni dopo, l'astronomo americano Edwin Hubble, grazie a dettagliate misure condotte su galassie lontane, dimostrò che l'universo era in espansione. Con un ripensamento entrato negli annali della storia della scienza, Einstein ritornò alla forma originaria delle sue equazioni, bollando il suo aggiustamento con la costante cosmologica come il piú grosso abbaglio della sua vita.[12] - Le ricerche piú recenti sulla velocità di espansione dell'universo mostrano, sorprendentemente, che la costante cosmologica, anche se molto piccola, potrebbe effettivamente essere diversa da zero.

Nonostante l'estrema riluttanza di Einstein, la relatività generale prevedeva l'espansione dell'universo. In effetti,

agli inizi degli anni venti - prima degli esperimenti di Hubble - il meteorologo russo Aleksandr Fridman aveva dimostrato a partire dalle equazioni originali di Einstein che tutte le galassie si allontanano tra di loro. Le osservazioni di Hubble - e molte altre successive - confermano questa sorprendente conseguenza della relatività generale. Einstein aveva fornito una spiegazione anche per l'espansione dell'universo: la sua teoria era una delle piú alte realizzazioni intellettuali di tutti i tempi.

Se lo spazio si sta espandendo, trascinando con sé le galassie che si allontanano l'una dall'altra, allora possiamo pensare di tornare indietro fino alle origini dell'universo. Rovesciando il processo, vediamo che lo spazio si contrae e porta le galassie ad essere sempre più vicine. Come accade in una pentola a pressione, lo schiacciamento e la compressione portano la temperatura a livelli altissimi: le stelle si disintegrano e si forma un plasma caldo fatto di costituenti elementari della materia. L'universo continua a contrarsi, la temperatura sale inesorabilmente, come pure la densità del plasma. Arrivando sempre piú vicini all'età del nostro universo (circa 15 miliardi di anni) succede un fatto straordinario: la materia di cui tutto è fatto - tutte le automobili, le case e le montagne della Terra, la Terra stessa, la Luna, Giove e tutti i pianeti, il Sole e tutte le stelle nella Via Lattea, la galassia di Andromeda con tutti i suoi 100 miliardi di stelle, e tutti i piú di 100 miliardi di galassie - è stretta in una morsa cosmica fino a densità impensabili. Man mano che l'orologio va indietro, l'universo si riduce alle dimensioni di un'arancia, poi di un limone, di un pisello, di un granello di sabbia e cosí via. Estrapolando il processo fino all'« inizio », arriviamo a un punto in cui sono concentrate tutta la materia e l'energia (torneremo su questo concetto di punto negli ultimi capitoli). Si pensa che un grande fuoco d'artificio cosmico, il big bang, abbia fatto esplodere questa miscela, spandendo in giro i semi da cui l'universo a noi noto si è evoluto.

L'immagine del big bang come di una bomba a frammentazione che lancia in giro il contenuto materiale dell'universo è intuitiva ma un po' fuorviante. Una bomba esplode in un particolare punto dello spazio e del tempo, e proietta la sua materia nello spazio circostante. Ma nel big bang lo « spazio circostante » non esiste: la contrazione prima si verifica perché tutto lo spazio si contrae. L'arancia, il limone e cosí via sono tutto l'universo, non un oggetto dentro all'universo. Il big bang è l'eruzione dello spazio compresso, la cui espansione, come un'onda di marea, porta con sé materia ed energia fino ai giorni nostri.

11. La relatività generale è esatta?

Negli esperimenti eseguiti finora non sono state trovate deviazioni dalle previsioni della teoria. Solo il tempo potrà dirci se qualche nuova tecnologia sarà in grado di scoprire qualche falla e di mostrare cosí che anche la relatività generale è una descrizione solo approssimata del funzionamento della natura. La verifica sistematica delle teorie a livelli crescenti di precisione è senz'altro uno dei modi in cui la scienza progredisce, ma non è il solo. L'abbiamo già visto: la necessità di trovare una nuova teoria della gravità non fu provocata da una confutazione sperimentale della gravitazione newtoniana, ma dal conflitto tra due teorie quella newtoniana e la relatività ristretta. Le pecche sperimentali furono trovate solo dopo la scoperta della relatività generale, cercando di misurare le microscopiche discrepanze osservabili tra le teorie rivali. Quindi, la coerenza interna di una teoria può giocare un ruolo altrettanto importante della sperimentazione.

Negli ultimi cinquant'anni la fisica si è trovata a fare i conti con un conflitto analogo a quello appena ricordato. La relatività generale sembra essere in contraddizione con un'altra teoria ben confermata sperimentalmente: la *meccanica quantistica.* Questo problema, tra le altre cose, ci impedisce di capire cosa accadde davvero a spazio, tempo e materia al momento del big bang, o che succede al centro di un buco nero. Piú in generale, il conflitto ci mette in guardia sull'esistenza di qualche pecca fondamentale nella nostra concezione del mondo. La soluzione di questo dilemma - che ha la meritata reputazione di essere il problema centrale della fisica contemporanea - è sfuggita anche ai piú raffinati teorici. Per capirne di piú dobbiamo imparare qualcosa sui fondamenti della meccanica quantistica, a cui dedicheremo il prossimo capitolo.

Capitolo quarto

Stranezze microscopiche

Reduci dalle loro fatiche interstellari, George e Mildred tornano sulla Terra e fanno un salto a bere qualcosa in un bar dal nome curioso, l'«H-tagliato». George ordina il solito - succo di papaya on the rocks per lui e vodka tonic per lei - e si mette comodo su una sedia, mani dietro la testa e un buon sigaro acceso; sta per tirare la prima boccata quando si accorge con stupore che il sigaro è sparito. Pensando che gli sia caduto di bocca si alza in piedi, per controllare che non ci siano buchi nella camicia o nei pantaloni, ma il sigaro non si trova. Mildred, attirata dallo scatto improvviso di George, alza lo sguardo e si accorge che il sigaro sta sul bancone, esattamente dietro la testa di George. «Cosa accidenti è successo? - dice lui. - E' come se mi fosse passato attraverso la testa, ma la lingua non mi brucia e non vedo buchi di sorta ». Mildred dà un'occhiata al marito e conferma che tutto sembra essere normale. Arrivano i drink. George e Mildred scrollano le spalle e archiviano l'episodio del sigaro tra le tante piccole stranezze inspiegabili della vita. Ma l'H-tagliato ha in serbo altre sorprese.

George ora si accorge che i cubetti di ghiaccio nel succo di papaya si muovono, sbattendo tra di loro e contro le pareti del bicchiere come automobiline impazzite. E non è tutto: nel bicchiere di Mildred, che è grande piú o meno metà dell'altro, i cubetti stanno danzando in modo ancora piú frenetico. Sono talmente veloci che allo sguardo sembrano un'unica massa di ghiaccio. Ma questo è niente: i nostri eroi, con gli occhi spalancati, vedono distintamente che un cubetto attraversa il bicchiere di Mildred e cade a terra. Il vetro sembra intatto: in qualche modo il ghiaccio è riuscito a passarci attraverso. « Deve essere qualche allucinazione dovuta a tutto il tempo che siamo stati nello spazio», dice George. Riescono in qualche modo a domare la furia dei cubetti, bevono i loro drink e se ne tornano a casa a riposare. Sono talmente scossi che non si accorgono di aver scambiato una porta dipinta a *trompe-l'oeil* per la porta vera; ma i clienti dell'H-tagliato sono abituati a vedere la gente passare attraverso i muri, e nessuno ci fa caso.

Un secolo fa, mentre Freud e Conrad esploravano mente e cuore delle tenebre, il fisico tedesco Max Planck svelava i primi misteri della meccanica quantistica, una teoria che sostiene, tra le altre cose, che le strane esperienze di George e Mildred all'H-tagliato non sono dovute ad allucinazioni, se riportate a un'opportuna scala. Queste bizzarrie sono tipiche del comportamento del nostro universo a livello microscopico.

1. Il quadro concettuale.

La meccanica quantistica è la teoria che ci serve per capire le proprietà microscopiche dell'universo. Così come la relatività generale e quella ristretta danno uno scossone alla nostra visione del mondo per quello che riguarda le situazioni in cui un corpo è molto veloce o molto massiccio, la meccanica quantistica fa lo stesso - se non di piú - per oggetti molto piccoli, a livello atomico e subatomico. Nel 1965 Richard Feynman, uno dei grandi guru della meccanica quantistica, scriveva:

Un tempo i giornali scrivevano che solo dodici uomini al mondo erano in grado di capire la teoria della relatività. Non penso che sia vero. Forse c'è stato un momento in cui un uomo solo ne capiva qualcosa, perché era l'unico che ci stava pensando, prima di scrivere il suo articolo. Ma dopo la pubblicazione, la teoria è stata in qualche modo capita da molta gente, certo piú di una dozzina di persone. Invece penso di poter affermare con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica.[1] Richard Feynman, The Character of Physical Law , MIT Press,Cambridge (Mass.) *1965, P. 129* [trad. it. La *legge fisica, Boringhieri,* Torino *1996, p. 1401.*

Sono passati piú di trent'anni da questa affermazione, ma penso che sia ancora vera. La relatività richiede un profondo ripensamento della nostra visione del mondo, ma quando se ne siano accettati i principi tutto segue in modo abbastanza lineare per via di deduzioni logiche. Se ritornate su quanto avete letto negli ultimi due capitoli e riflettete un po', vi accorgerete che tutte le conclusioni a cui siamo arrivati sono inevitabili. Le cose non stanno cosí per la meccanica quantistica. Le equazioni fondamentali di questa teoria erano già pronte piú o meno tutte nel 1928, e da allora sono state utilizzate per fare le previsioni sperimentali piú accurate di tutta la storia della scienza. Ma chi si occupa di meccanica quantistica si trova a seguire le formule dei «padri fondatori», ricette di esecuzione quasi meccanica, senza capire in realtà *perché il* tutto funzioni o addirittura quale sia il loro vero significato. Al contrario della relatività, pochissimi - se non nessuno - «sentono» intuitivamente di capire la meccanica quantistica.

Cosa implica tutto ciò? Vuol forse dire che a livello microscopico l'universo si comporta in modo cosí oscuro che la mente umana, evolutasi al fine di comprendere i fenomeni della vita quotidiana, non è in grado di sapere cosa accade davvero? O forse, per un caso della storia, l'uomo è arrivato a scoprire una formulazione particolarmente arzigogolata della teoria che, sebbene utile dal punto di vista quantitativo, offusca la vera natura delle cose? Nessuno lo sa. Forse in futuro qualche genio troverà una nuova versione che ci farà capire i come e i perché della teoria - o forse no. La sola cosa certa è che la meccanica quantistica ci mostra senza ombra di dubbio che alcuni concetti basilari nel mondo macroscopico *perdono ogni significato* a livello atomico e subatomico . Quindi dobbiamo modificare linguaggi e modi di ragionare se vogliamo capire come funzionano le cose a scala microscopica.

In questo capitolo vedremo le basi di questa nuova «lingua» e scopriremo che ci riserva un bel po' di sorprese. Se nel corso della lettura la meccanica quantistica vi sembrasse troppo strana o addirittura ridicola, tenete in mente un paio di cose. Primo: oltre al fatto che la teoria è coerente dal punto di vista matematico, l'unico motivo per crederci è che ha un incredibile successo sperimentale. (Se uno sconosciuto vi raccontasse la vostra infanzia con dovizia di particolari privatissimi, sarebbe difficile non credergli quando afferma di essere un vostro fratello segreto). Secondo: non siete i soli a reagire infastiditi. Anzi, siete in buona compagnia: Einstein rifiutò sempre di accettarla del tutto. Persino Niels Bohr, uno dei pionieri della teoria, nonché uno dei suoi piú strenui paladini, disse una volta che se non vi vengono le vertigini al pensiero della meccanica quantistica, allora non l'avete davvero capita.

2. Il forno è troppo caldo.

La strada verso la meccanica quantistica inizia con un rompicapo. Immaginate di avere un forno perfettamente isolato, che riscaldate a una temperatura di 180° C. Anche se l'interno del forno è privo di aria, il riscaldamento genera onde di radiazione, dello stesso tipo di quelle emesse dalla superficie del Sole o da un ferro arroventato: calore e luce sotto forma di onde elettromagnetiche.

Le onde elettromagnetiche trasportano energia; la vita sulla Terra ad esempio, dipende fondamentalmente dall'energia solare trasmessa dalle onde che la nostra stella emette. All'inizio del Novecento, alcuni scienziati si misero a calcolare l'energia totale di tutte le onde all'interno di un forno isolato a una temperatura data. Con tecniche ben sperimentate, trovarono che il risultato era insensato: indipendentemente dalla temperatura, l'energia totale nel forno era *infinita.*

E ovvio che ciò non ha senso: un forno può immagazzinare una considerevole quantità di energia, ma non una quantità infinita. Per capire meglio la soluzione di questo mistero, vediamolo un po' piú nei dettagli. Dalla teoria di Maxwell si deduce che le onde generate dal forno devono avere un numero *intero* di picchi e ventri per incastrarsi perfettamente tra due pareti opposte (come è mostrato nella figura 4.1). Introduciamo tre termini tecnici: la *lunghezza d'onda* è la distanza tra due picchi o ventri successivi (vedi fig. 4.2); minore è la lunghezza d'onda, maggiore è il numero di ondulazioni che si riescono a infilare tra le pareti. La *frequenza* è il numero di oscillazioni complete che un'onda compie ogni secondo. Frequenza e lunghezza d'onda sono legate tra loro: al diminuire dell'una cresce l'altra. E un fatto facile da visualizzare. Immaginate di dare uno scossone a una corda legata a un muro ad un'estremità. Agitando il braccio in su e in giù generate un certo tipo di onde, la cui frequenza è pari al numero di volte in cui il braccio si alza e s'abbassa in un secondo. Se vi muovete lentamente, le onde sono piú lunghe; mentre agitandovi freneticamente otterrete onde piú concentrate. L'ampiezza, infine, è l'altezza massima di un'onda, come mostrato nella figura 4.2.

Figura 4. 1.
Secondo la teoria di Maxwell, le onde di radiazione all'interno di un forno hanno un numero intero di picchi e ventri, cioè formano sempre cicli completi.

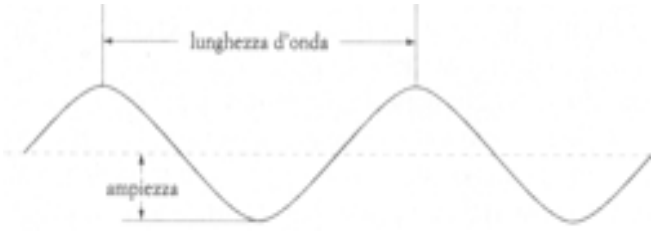

Figura 4.2.
La lunghezza d'onda è la distanza tra due successivi picchi o ventri di un'onda. L'ampiezza è la sua massima altezza o profondità.

Se le onde elettromagnetiche vi sembrano troppo astratte, pensate alle onde sonore che si producono pizzicando una corda di violino. Frequenze diverse corrispondono a note diverse: piú elevata è la frequenza, piú alta è la nota. L'ampiezza dell'onda sonora dipende dalla forza con cui si pizzica la corda; un pizzico piú energico immette (appunto) piú energia nell'onda, e a maggiore energia corrisponde una maggiore ampiezza. Il risultato è che il suono è piú forte.

Usando la termodinamica che si conosceva nell'Ottocento, si può calcolare quanta energia viene immessa dalle pareti del forno nelle onde elettromagnetiche per ciascuna delle lunghezze d'onda permesse (cioè quanto forte le pareti «pizzicano» ogni tipo d'onda). Il risultato è questo: tutte le onde - indipendentemente dalla lunghezza - portano la stessa energia (il cui importo è funzione della temperatura del forno). In altre parole, tutti i possibili percorsi delle onde danno lo stesso contributo in termini di energia.

A una prima occhiata sembra un risultato interessante quanto innocuo. Ma non è cosí, perché è la campana che suona a morto per la fisica classica. Vediamo perché. Sappiamo che le onde del nostro problema devono avere un numero intero di picchi e ventri, il che naturalmente ne esclude moltissimi tipi; ma dentro il forno c'è comunque un numero *infinito* di onde ammissibili, corrispondenti a tutti i numeri interi. Poiché portano tutte la stessa dose di energia, dobbiamo concludere che la quantità totale di energia è anch'essa infinita. Al volgere del secolo, la teoria scopriva una crepa gigantesca nel suo edificio.

3. Pacchetti di inizio secolo.

Nel i 900 Planck ebbe un'intuizione felice che l'avrebbe portato a risolvere il rompicapo e a vincere nel 1918 il Nobel per la fisica.[2] Anche se Planck svelò il paradosso dell'energia infinita, sembra che questo non fosse il suo scopo originario. Egli cercava piuttosto di risolvere un problema correlato: il fatto che le prove sperimentali mostrano che l'energia in un forno caldo - un *corpo nero* per essere piú precisi - si distribuisce su molte lunghezza d'onda. Per maggiori dettagli su questa storia si veda Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and Quantum* Discontinuity, Clarendon Press, Oxford *1978* [trad. it. *Alle origini della fisica contemporanea, Il* Mulino, Bologna *1981].*

Per darvi un'idea di cosa si tratta, seguite questa storiella. Vi trovate insieme con un enorme numero di individui - diciamo un numero «infinito» - inscatolati in uno stanzone gelido, il cui proprietario è un profittatore. Un termostato ultimo modello fa mostra di sé alla parete; ma vi accorgete presto che le tariffe imposte dal proprietario per il riscaldamento sono altissime. Se il termostato viene messo sui 10° C, ognuno deve pagare 100.000 lire al giorno; se si alza a 15° C, la cifra sale a 150.000 e cosí via. Visto che i vostri compagni di sventura sono infiniti, vi rendete conto che il malvagio proprietario guadagnerà una quantità infinita di denaro non appena il riscaldamento verrà acceso.

Ma leggendo meglio il contratto di affitto, vi accorgete di una possibile scappatoia. Il proprietario è un uomo molto occupato e non intende dare resto, soprattutto a un numero infinito di inquilini. Esiste dunque un sistema basato sulla fiducia: solo chi può pagare la cifra esatta paga interamente, gli altri danno quello che hanno. Vi viene allora in mente di raccogliere tutti i soldi dei vostri compagni e di organizzare il pagamento in questa maniera: un individuo prende tutte le monete da 50 lire, un altro tutte quelle da 100, e cosí via; in questo strano mondo, però, esistono strane banconote, e dopo quelle da 500 000 lire ve ne sono altre di valore ancora superiore, senza un limite massimo. Spavaldamente, posizionate il termometro a 25°C. Subito il proprietario si presenta a riscuotere il dovuto (250.000 lire a testa). Ecco cosa succede: chi ha le monete da 50 lire gliene dà 5000, chi ha quelle da 100 lire gliene dà 2500 e cosí via, fino ad arrivare a chi ha le banconote da 50 000, che ne paga 5, e a chi ha quelle da 100.000, che ne dà solo 2 (perché con 3 il proprietario dovrebbe dare resto). Tutti gli altri, però, hanno solo banconote da 500 000 in su, e quindi non possono pagare, perché ci sarebbe comunque un resto. Il proprietario, che si aspettava una quantità infinita di denaro, si ritrova invece con la misera somma di 2.450 000 lire (ci sono 9 tipi di monete e banconote dalle 50 alle 50.000 lire, e quindi 9 persone che possono pagare 1e 250.000; aggiungendo 1e 200.000 pagate da chi ha le banconote da 100.000 il conto torna).

Planck si comportò in modo molto simile nei confronti delle pretese dell'energia infinita. Arditamente, avanzò l'ipotesi che l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica potesse presentarsi - come il denaro contante - solo in pacchetti ben precisi. Introdotta una «Moneta energetica», i valori possibili sono solo multipli interi di questa unità: uno, due, tre eccetera, e nient'altro, proprio come non esiste un quarto di cento lire o mezza banconota da mille. I valori possibili dell'energia, però, non sono certo decisi dalla Zecca. In cerca di una spiegazione piú profonda, Planck ipotizzò che il contenuto energetico minimo di un'onda - il pacchetto più piccolo che può trasportare - fosse determinato dalla sua frequenza: per la precisione, che l'energia minima fosse pro*porzionale alla frequenza.* Proprio come le onde lunghe sull'oceano si propagano con maestosa calma, mentre quelle rovinose sono ravvicinate e rapide, la radiazione a onda lunga porta intrinsecamente meno energia di quella a onda corta.

I calcoli di Planck mostrarono che questa parcellizzazione dell'energia emendava l'assurdo risultato relativo al forno. Non è difficile capire il perché. Abbiamo visto che le leggi della termodinamica ottocentesca prevedevano che tutte quante le onde generate all'interno di un forno riscaldato contribuissero (ognuna con la stessa quantità) all'energia totale. Ma come gli inquilini che non possono pagare il proprietario perché hanno banconote troppo grandi, se un'onda ha un'energia minima intrinseca piú grande del valore che dovrebbe teoricamente fornire all'energia totale, non «paga» e rimane inerte. Poiché l'energia minima è proporzionale alla frequenza, man mano che esaminiamo onde di lunghezza sempre piú corta (e quindi di maggiore frequenza), arriveremo a trovarne una la cui quota di energia minima è maggiore del contributo teorico. Le sue compagne di lunghezza ancora piú corta (come gli inquilini con le banconote di valore elevato) a maggior ragione non possono fornire energia al valore totale. Quindi, visto che solo un numero finito di onde può esser preso in considerazione, l'energia totale del sistema sarà finita, proprio come la quantità di denaro che il proprietario si ritrova in tasca. Che si tratti di denaro o di energia, la suddivisione in pacchetti, accoppiata con il fatto che i pacchetti diventano sempre piú grandi fino a superare un certo valore, cambia un risultato infinito in uno finito.[3] Piú precisamente, Planck dimostrò che le onde il cui contenuto minimo di energia è maggiore del loro contributo energetico teorico *medio* (secondo la termodinamica dell'Ottocento) si annullano esponenzialmente. Il fenomeno è piú evidente al crescere della frequenza d'onda

Planck aveva compiuto un passo fondamentale. Ciò che convinse gli scienziati della bontà della sua teoria fu il fatto che questa era in straordinario accordo con i dati sperimentali. Bastava regolare un parametro della sua nuova equazione per predire esattamente l'energia totale di qualsiasi forno per qualsiasi temperatura; si trattava del fattore di proporzionalità tra la frequenza di un'onda e il suo pacchetto minimo di energia. Planck ne calcolò il valore - oggi noto come *costante di Planck* e indicato con il simbolo ~~h~~ (che si legge «acca tagliato ») - e scoprì che era minuscolo: circa un miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo in unità della vita di ogni giorno come centimetri, secondi e grammi.[4] La costante di Planck è pari a 1,05 x 10-27 g x cm2 / sec. [La costante ~~h~~ - detta costante di Planck razionalizzata - è uguale a *h/2*, essendo *h* quella che piú comunemente viene chiamata costante di Planck *tout court.* Nella traduzione abbiamo rispettato la scelta dell'autore. *N.d.C]*

Il valore piccolo della costante di Planck implica che i pacchetti minimi d'energia sono altrettanto piccoli; questo ci dà l'illusione di poter variare l'energia di un'onda in modo continuo, ad esempio quando pizzichiamo la corda di un violino. Invece l'intensità sonora prodotta (l'energia) passa attraverso valori discreti come i gradini di una scala, ma i gradini sono

talmente piccoli che saltando tra l'uno e l'altro ci sembra di salire una rampa continua. La dimensione di questi gradini, come abbiamo visto, cresce al crescere della frequenza, e questa è la chiave di volta che risolve il paradosso dell'energia infinita.

Vedremo subito che l'ipotesi di Planck serve a fare ben altro, rispetto a calcolare l'energia di un forno. Tanto per gradire, scardina molte delle nostre certezze sul mondo fisico. Il fatto che ħ sia piccolo fa sì che gli effetti sorprendenti si notino solo nel mondo microscopico; ma se ħ fosse molto piú grande tutte le stranezze capitate a George e Mildred al bar H-tagliato sarebbero eventi quotidiani. Vedremo che a scala atomica è proprio così.

4. Cosa sono i pacchetti?

Planck non sapeva come giustificare la sua parcellizzazione dell'energia. Certo, funzionava bene, ma nessuno era in grado di dare una spiegazione convincente del perché le cose stessero così. (Per riportare una celebre battuta di George Gamow, è come se la natura ci permettesse di bere la birra solo a boccali da una pinta),[5] Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way,* Anchor, New York *1989, p. 286* [trad. it. *L'avventura dell'universo,* Leonardo, Milano i 1990].

Nel *1905* Einstein scoprì la chiave del mistero, e per questo fu insignito del premio Nobel nel 1 921.

La sua idea arrivava da un'altra parte, in particolare dai suoi studi sul fenomeno noto come effetto fotoelettrico. Nel 1887 il fisico tedesco Heinrich Hertz scoprì che quando la radiazione elettromagnetica - la luce -colpisce alcuni metalli, questi emettono elettroni. Il fatto in sé non ha nulla di speciale: nei metalli, gli elettroni piú esterni sono spesso legati debolmente agli atomi (il che li rende ottimi conduttori di elettricità) e la luce che li colpisce trasferisce loro una parte della sua energia (proprio come fa sulla nostra pelle, di modo che sentiamo calore); questa nuova energia può eccitare gli elettroni fino al punto che quelli meno strettamente legati possono sfuggire alla superficie del metallo.

Ma uno studio accurato delle proprietà degli elettroni emessi mostra tutte le stranezze dell'effetto fotoelettrico. Si potrebbe pensare che al crescere dell'intensità luminosa cresca anche la velocità degli elettroni in fuga, perché la radiazione elettromagnetica corrispondente è piú energetica. Ma questo non accade: aumenta il *numero* degli elettroni emessi, ma la loro velocità non cambia. D'altro canto, si dimostra sperimentalmente che la velocità degli elettroni aumenta al crescere della frequenza della luce. (Per le radiazioni elettromagnetiche nello spettro visibile, un aumento della frequenza corrisponde a un cambiamento di colore dal rosso all'arancio e così via fino al violetto. Le frequenze piú alte di quelle del violetto non sono visibili e corrispondono all'ultravioletto e ai raggi X; le frequenze più basse di quelle del rosso sono anch'esse invisibili e corrispondono alla radiazione infrarossa). Addirittura, al decrescere della frequenza della luce si raggiunge un punto in cui la velocità degli elettroni si annulla, cioè nessun elettrone sfugge dalla superficie, anche in presenza di luci fortissime. Per qualche misterioso motivo, è il colore della luce incidente, non la sua energia, a determinare se e come gli elettroni vengano emessi.

Per capire come Einstein sia riuscito a spiegare il fenomeno, torniamo al nostro stanzone, dove ora fa un bel calduccio. L'orrido proprietario detesta i bambini e costringe tutti i minori di quindici anni a vivere in un seminterrato, che gli adulti possono vedere affacciandosi a una balconata. Come crudeltà aggiuntiva, ha stabilito che un bambino può lasciare quel postaccio solo se paga a una guardia una tassa di *950* lire. I bimbi non possiedono denaro, e cosí gli adulti cercano di salvarli gettando loro monete e banconote dalla balconata.

Ricordiamo che i soldi sono stati ridistribuiti in modo che ogni adulto possieda solo banconote e monete di un unico tipo. Il portatore delle cinquanta lire inizia a gettare qualche moneta, ma la somma è troppo scarsa per soddisfare la marea « infinita » di bambini che lottano selvaggiamente per accaparrarsi il denaro. Anche se la quantità di monete da *50* lire gettate è enorme, praticamente nessuno riuscirà in questo modo a raccogliere la cifra sufficiente per andarsene. Lo stesso accade quando iniziano i lanci di monete da *100* , 200 e *500* lire. Ma quando il possessore delle 1.000 lire inizia a gettare banconote, succede un fatto nuovo: i fortunati bambini che riescono ad afferrare anche un solo biglietto possono andarsene immediatamente. Al crescere della quantità di banconote gettate cresce anche il numero dei fuggiaschi, ognuno dei quali si ritrova esattamente con *50* lire di resto.

Cosa ha a che fare tutto questo con l'effetto fotoelettrico ? Studiando i dati sperimentali, Einstein ipotizzò che l'idea di Planck dei «pacchetti» fosse applicabile anche alla luce. Secondo la sua teoria, un raggio luminoso deve essere pensato come un fascio di *particelle,* che furono poi battezzate *fotoni* dal chimico Gilbert Lewis (abbiamo già incontrato i fotoni negli orologi a luce del capitolo II). Per darvi un'idea delle loro dimensioni, una normale lampadina da 100 watt emette

circa cento miliardi di miliardi di fotoni (1020) al secondo. Forte di questa ipotesi, Einstein spiegò il meccanismo microscopico alla base dell'effetto fotoelettrico: un elettrone -fugge dalla superficie metallica se viene colpito da un fotone abbastanza carico di energia. Ma cosa determina l'energia di un fotone? Per accordarsi con i dati sperimentali, Einstein seguì le orme di Planck e ipotizzò che questa fosse proporzionale alla frequenza dell'onda luminosa, con la costante di Planck come fattore di proporzionalità.

Gli elettroni, come i bambini del seminterrato, devono ricevere da un fotone una quantità minima di energia per potere scappare. E come per i bambini, è molto improbabile che un elettrone sia colpito da piú di un fotone: la maggioranza non viene nemmeno sfiorata. Un fotone non abbastanza energetico è come la moneta da *50* lire dell'esempio: cosí come i bambini non possono andarsene anche in presenza di una pioggia di monetine, cosí gli elettroni non vengono emessi anche se bombardati da una luce potentissima ma i cui fotoni hanno frequenze (e dunque energie) troppo basse.

Quando arrivano le banconote i bambini cominciano ad andarsene,allo stesso modo gli elettroni scappano non appena la frequenza della luce supera una certa soglia. Se gli adulti buttano giù quantità enormi di 1000 lire, moltissimi saranno i bambini in grado di uscire; cosí, una enorme intensità luminosa, cioè un numero molto maggiore di fotoni, farà saltare molti piú elettroni. Ma notate che l'energia rimasta a questi elettroni dopo la fuga dipende esclusivamente dall'energia del fotone che li colpisce, ed è quindi determinata dalla frequenza della luce, non dalla sua intensità. Così come tutti i bambini si ritrovano *50* lire in tasca dopo essere usciti, indipendentemente dal numero di banconote lanciate, cosí tutti gli elettroni emessi hanno la stessa energia, e quindi la stessa velocità, indipendentemente dall'intensità della fonte luminosa. Se vogliamo che i bambini si ritrovino con piú soldi in tasca, dobbiamo iniziare a lanciare le banconote da 2000 lire e oltre; se vogliamo che gli elettroni lascino la superficie a velocità maggiore dobbiamo incrementare la frequenza delle onde luminose - cioè il valore energetico dei singoli fotoni.

Tutto questo si accorda con i dati sperimentali. La frequenza della luce, cioè il suo colore, determina la velocità degli elettroni emessi, mentre l'intensità luminosa ne regola il numero. Einstein mostrò cosí che l'ipotesi di Planck sui pacchetti di energia riflette in realtà una caratteristica fondamentale delle onde elettromagnetiche: sono formate da particelle (i fotoni) che sono piccoli «grumi» di luce, o *quanti.* La parcellizzazione dell'energia è dunque una conseguenza del fatto che le onde sono fatte a pacchetti.

La scoperta di Einstein fu un progresso storico. Ma come vedremo le cose non andarono cosí lisce come sembra.

5. Onda o particella?

Tutti sanno che l'acqua - e quindi ogni onda del mare - è composta da un grande numero di molecole. Allora perché ci sorprende il fatto che le onde luminose sono anch'esse fatte di «molecole», cioè di fotoni? Ci sono buone ragioni per stupirsi, e ora vediamo perché. L'idea che la luce sia costituita da corpuscoli non è nuova: risale a trecento anni fa ed è dovuta a Newton. Ma non tutti i colleghi dello scienziato inglese erano d'accordo con lui. Il grande fisico olandese Christiaan Huygens pensava infatti che la luce fosse un'onda. Il dibattito infuriò per secoli, ma alcuni esperimenti eseguiti da Thomas Young ai primi dell'Ottocento mostrarono che in questo caso Newton aveva torto.

Una variante dell'esperimento di Young - noto come esperimento della doppia fenditura - è mostrata nella figura 4.3. A Feynman piaceva ripetere che tutta la meccanica quantistica può essere intuita riflettendo attentamente su questo esperimento, quindi è bene parlarne in dettaglio. Come si vede nella figura, si punta della luce su una barriera opaca nella quale sono tagliate due fenditure richiudibili. Dietro alla barriera poniamo una lastra fotografica che tenga traccia della luce che passa attraverso le fenditure: le aree piú chiare della lastra indicheranno una maggiore quantità di luce incidente. L'esperimento consiste nel confrontare cosa succede quando apriamo una sola o entrambe le fenditure.

Figura 4.3.

Un raggio di luce viene sparato contro una barriera in cui sono presenti due fenditure. La luce che passa oltre, se apriamo una o entrambe le fenditure, viene registrata su una lastra fotografica posta dietro la barriera.

Figura 4.4.
La fenditura di destra è aperta; l'immagine prodotta è quella in figura.

Aprendo quella di destra, otteniamo che la lastra mostra l'immagine riprodotta nella figura 4.4. Il risultato è sensato: la luce che colpisce la lastra può passare solo a destra e la zona chiara si trova dunque sul lato destro. Il discorso è perfettamente simmetrico se apriamo solo la fenditura di sinistra, come è mostrato nella figura 4.5. Ora apriamo entrambe le fenditure. Secondo la teoria corpuscolare di Newton, la configurazione risultante dovrebbe essere quella nella figura 4.6, cioè una sovrapposizione della 4.4 e della 4.5. In sostanza, se pensate ai corpuscoli luminosi come a pallini sparati contro la barriera, quelli rivelati dalla lastra devono essere concentrati nelle due aree allineate con le due fenditure. Invece, la teoria ondulatoria porta a fare previsioni molto diverse. Vediamole insieme.

Immaginiamo per un attimo di avere a che fare con acqua e non luce. Troveremo gli stessi risultati, ma è piú facile visualizzare un'onda su un lago che un'onda luminosa. Quando un flusso d'acqua raggiunge la barriera, due treni di onde circolari escono dalle fenditure, simili a quelli creati da un sasso in uno stagno, come nella figura 4.7 (potete provarci anche voi con una barriera di cartoncino e una vasca). I due pacchetti di onde si sovrappongono, con risultati non banali.

Figura 4.5.
Come la figura 4.4, ma con la fenditura sinistra aperta.

Figura 4.6.
Secondo la teoria particellare di Newton, quando entrambe le fenditure sono aperte l'immagine sulla lastra è l'unione di quelle nelle figure 4.4 e 4.5.

Se si incontrano due picchi, l'altezza dell'acqua in quel punto aumenta; con due ventri, la depressione aumenta; e se un ventre si sovrappone a un picco le due onde *si cancellano.* (Questo è il principio che sta alla base dei piú sofisticati meccanismi di insonorizzazione: esaminano l'onda sonora in arrivo e la contrastano con una di forma «opposta», fino a cancellare il rumore). Tra questi tre casi estremi ci sarà una grande varietà di innalzamenti e cancellazioni parziali. Se piazzassimo una fila di barchette parallela alla barriera e misurassimo quanto ciascuna di esse è sballottata dalle onde, otterremmo risultati simili a quelli mostrati a destra della figura *4.7.* Le barche vengono maggiormente scosse dove c'è sovrapposizione di due picchi, e non vengono disturbate affatto dove c'è cancellazione.

Lo stesso accade alla lastra fotografica, che registra in ogni punto quanto è stata «scossa» dall'onda luminosa; ecco perché un analogo ragionamento ci porta a concludere che quando le due fenditure sono aperte la configurazione sulla lastra dovrebbe essere come nella figura *4.8.*

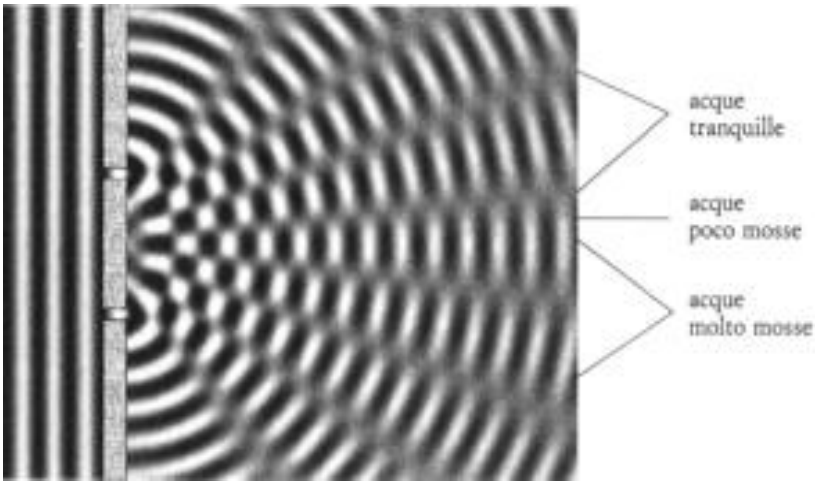

Figura 4.7.
Le onde circolari prodotte dall'acqua che emerge dalle due fenditure si sovrappongono, e fanno sì che l'onda risultante sia maggiore in alcuni punti e minore in altri.

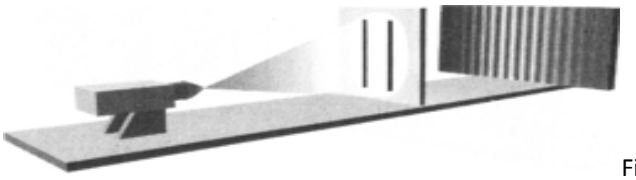

Figura 4.8.
Se la luce è un'onda, quando entrambe le fenditure sono aperte si genera interferenza sulla parete di fondo.

Le zone chiare sono quelle in cui si è verificata una sovrapposizione di picchi o ventri, quelle scure corrispondono alle cancellazioni. Questo insieme di bande scure e chiare è noto con il nome di figura di *interferenza.* E' molto diversa da quella che abbiamo visto nella figura *4.6:* ecco dunque un esperimento che ci può dire con certezza se la luce è un'onda o una particella. Young ne eseguì una versione analoga e i suoi risultati si accordavano con la figura *4.8,* confermando quindi la teoria ondulatoria. Ci volle un po' di tempo per accettare questo fatto, ma la teoria corpuscolare newtoniana era sconfitta. Qualche anno dopo, Maxwell diede solide fondamenta matematiche al modello ondulatorio.

Ma da quanto abbiamo visto sembra che Einstein, l'uomo che aveva già demolito la venerabile teoria newtoniana della gravità, abbia poi fatto risorgere la teoria newtoniana corpuscolare, grazie all'arrivo dei fotoni. La domanda è ovvia: come è possibile che una teoria corpuscolare spieghi l'interferenza mostrata nella figura *4.8 ? Una* prima spiegazione potrebbe essere questa: l'acqua è composta da « particelle », le molecole di H2O. Quando molte di queste particelle fluiscono insieme producono le onde, le quali hanno il comportamento visto nella figura *4.7.* Sembra ragionevole pensare che proprietà di tipo ondulatorio, come le figure di interferenza, possano risultare da una teoria corpuscolare della luce a causa dell'enorme numero di fotoni coinvolti.

In realtà il mondo microscopico è molto piú complicato. Se diminuiamo sempre piú l'intensità luminosa dell'esperimento, fino a emettere *un fotone alla volta,* ad esempio uno ogni dieci secondi, la lastra fotografica mostrerà *in ogni caso* la figura d'interferenza della *4.8,* naturalmente se aspettiamo abbastanza tempo perché si formi, visto che i fotoni la colpiscono uno alla volta. Questo è incredibile. Come può un gruppo di singoli fotoni, ognuno dei quali raggiunge la lastra in un tempo diverso, mettersi d'accordo per produrre la figura di interferenza? Il senso comune ci dice che le singole particelle passeranno o dalla fenditura di destra o da quella di sinistra, e dunque dovrebbe risultare qualcosa di simile alla figura *4.6.* Ma cosí non è.

Se non avete strabuzzato gli occhi di fronte a questo fatto, significa che lo conoscevate già, o che siete troppo blasé, o che la descrizione non è stata abbastanza vivace. Nel caso la terza ipotesi sia vera, vediamo di raccontare la storia in un altro modo. Chiudiamo la fenditura sinistra e spariamo i fotoni uno alla volta. Qualcuno passa attraverso la fenditura destra, altri no. I primi creano, uno dopo l'altro, un'immagine simile a quella della figura *4.4.* Ora ripetiamo l'esperimento con entrambe le fenditure aperte. Ci aspettiamo ovviamente che in questo modo il numero di fotoni che passano aumenterà, e che quindi la lastra sarà esposta a piú luce rispetto alla prima volta. Ma confrontando le due lastre, ci accorgiamo che non solo alcune aree scure della prima sono diventate chiare (come è ragionevole) nella seconda, ma anche che è successo l'inverso. *Aumentando il* numero dei fotoni che colpiscono la lastra abbiamo fatto *diminuire la* luminosità in alcune zone. In qualche modo, ci devono essere fotoni capaci di cancellarsi l'uno con l'altro. Pensate a questa follia: fotoni che sarebbero passati dalla fenditura destra quando solo questa era aperta non riescono a farlo quando è aperta anche la sinistra (sono quelli delle zone chiare nella figura 4.4 ma scure nella 4.8). Come è possibile che un pacchetto di fotoni che passa da una fenditura sia influenzato dall'apertura dell'altra fenditura? Per riprendere un esempio di Feynman, sostituiamo ai fotoni dei proiettili: quando entrambe le fenditure sono aperte, alcune zone del bersaglio non sono toccate; ma le stesse zone vengono invece colpite quando una sola fenditura è aperta.

Questo esperimento mostra che i corpuscoli di Einstein sono molto diversi da quelli di Newton. I fotoni sono particelle, ma in qualche modo hanno in sé le caratteristiche ondulatorie della luce. Il fatto che l'energia dei fotoni sia determinata da un parametro ondulatorio - la frequenza - è il segno che siamo in presenza di uno strano connubio. L'effetto fotoelettrico ci mostra che la luce ha proprietà corpuscolari; l'esperimento della doppia fenditura rende manifesta la proprietà di interferenza tipica delle onde. Messi insieme, dimostrano che la *luce* ha *proprietà sia corpuscolari sia ondulatorie.* Nel mondo microscopico dobbiamo abbandonare il buon senso, che ci dice che un oggetto è un onda oppure una particella, e contemplare la possibilità che sia *entrambe le cose.* Ora ci ricordiamo le parole di Feynman: «nessuno capisce davvero la meccanica quantistica». Possiamo farci belli con parole come «dualità onda-particella»; possiamo tradurre questi esperimenti in una serie di formule che si applicano a molti fenomeni con straordinaria precisione; ma è molto duro capire a livello intuitivo questa scioccante caratteristica del mondo microscopico.

6. Le particelle di materia sono anche onde.

Nei primi trent'anni del ventesimo secolo, i piú grandi fisici teorici si dedicarono anima e corpo alla ricerca di un quadro concettuale matematicamente coerente e fisicamente sensato in cui studiare queste nuove scoperte sul comportamento microscopico della natura. Ad esempio, sotto la guida di Niels Bohr, a Copenaghen, si fecero grandi progressi nello studio delle proprietà della luce emessa da atomi di idrogeno riscaldati al calor bianco. Ma fino a metà degli anni venti si procedeva soprattutto tentando di unire alla bell'e meglio le idee della fisica classica ai nuovi fenomeni. Si era ben lontani da una teoria coerente, chiara e logica come quelle di Newton o di Maxwell.

Nel 1923 un giovane francese di nobili origini, Louis de Broglie, gettò nella mischia quantistica una nuova idea, che presto avrebbe spalancato le porte alla teoria moderna della meccanica quantistica e che gli avrebbe regalato il Nobel nel 1929. Grazie a una serie di deduzioni a partire dalla relatività ristretta, de Broglie ipotizzò che la dualità onda-particella non si dovesse applicare solo alla luce, ma anche alla materia. Il ragionamento era più o meno questo: la relatività ristretta aveva collegato la massa all'energia con la formula $E = mc2,$ mentre Planck ed Einstein avevano messo in relazione l'energia con la frequenza delle onde; combinando le due cose, si può pensare che anche la massa abbia una «incarnazione» ondulatoria. Dopo molte speculazioni, de Broglie propose questa idea: cosí come la luce è un fenomeno ondulatorio che può essere descritto in modo ugualmente valido da una teoria particellare, un elettrone che è comunemente inteso come una particella potrebbe avere specularmente una descrizione altrettanto valida in termini di

onde. Einstein fu entusiasta della proposta, visto che gli sembrava una naturale prosecuzione dei suoi studi sulla relatività e sui fotoni. Ciò non toglieva, comunque, che la teoria dovesse essere verificata sperimentalmente. Tale conferma sarebbe arrivata di lì a poco.

A metà degli anni venti, Clinton Davisson e Lester Germer, che lavoravano al laboratorio di ricerche della compagnia telefonica Bell, stavano studiando il comportamento di un fascio di elettroni sparato su un pezzo di nichel. Ciò che importa sapere qui è che i cristalli di nichel si comportano in modo molto simile alle fenditure viste prima; anzi: è legittimo pensare a questo nuovo esperimento come a una variante di quello precedente, con la sola differenza che si usa un fascio di elettroni e non di fotoni. Quando Davisson e Germer esaminarono le figure formate dagli elettroni su uno schermo fosforescente posto dietro al nichel, trovarono una cosa sorprendente: la struttura era molto simile a quella della figura 4.8. Quindi anche gli elettroni generano figure di interferenza, il che è il marchio di fabbrica delle *onde.* Nei punti scuri dello schermo gli elettroni in qualche modo si «cancellavano» come per sovrapposizione di un picco e un ventre. Anche se il fascio di elettroni veniva ridotto fino ad emettere, ad esempio, un elettrone ogni dieci secondi, i risultati non cambiavano: lentamente, un puntino alla volta, si formava la figura d'interferenza. Gli elettroni, dunque, «interferiscono» tra loro in qualche modo, come i fotoni. Siamo costretti a concludere che ogni elettrone ha in sé una caratteristica ondulatoria, insieme con la consueta descrizione particellare.

Qui ci siamo concentrati sugli elettroni, ma esperimenti analoghi mostrano che *tutta* la materia si comporta a questo modo. Come si concilia tutto ciò con l'esperienza quotidiana di una materia solida e stazionaria, ben lontana dall'essere un'onda? Ce lo spiega la formula di de Broglie, secondo cui la lunghezza d'onda di una particella di materia è proporzionale alla costante di Planck *h* (precisamente, è data da *h* divisa per la quantità di moto della particella). Poiché la costante è minuscola, lo sono anche le lunghezze d'onda risultanti, se viste alla scala della nostra esperienza quotidiana; ecco perché la dualità si mostra solo con complesse investigazioni del mondo microscopico. Proprio come l'enorme valore della velocità della luce c ci nasconde la vera natura dello spaziotempo, cosí la piccolezza di h ci impedisce di vedere gli aspetti ondulatori della materia nel nostro mondo consueto.

7. Onde di che?

L'esperimento di Davisson e Germer rese tangibile la natura ondulatoria degli elettroni. Ma *di cosa sono fatte* queste onde? Erwin Schródinger avanzò l'ipotesi che le onde fossero elettroni «spalmati». L'immagine era molto intuitiva, ma troppo rozza: un oggetto «spalmato» è distribuito nello spazio, mentre un «pezzo» di elettrone non si è mai visto (non può esistere mezzo elettrone, un terzo di elettrone e cosí via). Nel 1926 Max Born propose un'idea molto piú raffinata di quella di Schródinger, e questa idea -grazie soprattutto al lavoro del gruppo di Bohr - divenne l'interpretazione piú comune, fino ai giorni nostri. La teoria di Born è una delle cose piú strane che si incontrano in meccanica quantistica, ma è stata comunque confermata in modo straordinario dalle prove sperimentali. Ecco cosa dice: l'onda di un elettrone deve essere interpretata in termini *probabilistici.* La probabilità di trovare un elettrone in un certo posto dipende dall'ampiezza (piú precisamente, dal quadrato dell'ampiezza) dell'onda associata: i punti dove l'onda è piú ampia sono quelli in cui è piú probabile trovare l'elettrone, e viceversa per i punti dove l'ampiezza è piccola. Un esempio è mostrato nella figura 4.9.

Questa è un'idea davvero strana: cosa ci sta a fare la probabilità nel regno delle leggi fisiche? La probabilità salta fuori in eventi come le corse dei cavalli, nei lanci di una moneta o al tavolo della roulette, tutti casi in cui riflette semplicemente una conoscenza *incompleta.* Se conoscessimo *perfettamente* la velocità della roulette, il peso e la composizione della pallina, nonché la sua posizione e velocità iniziale, la forma delle cellette e cosí via, e se avessimo a disposizione un computer abbastanza potente, saremmo in grado di prevedere l'esito del lancio con certezza, grazie alle leggi della fisica classica. I casinò prosperano proprio grazie all'impossibilità di conoscere tutte queste informazioni e di fare i calcoli necessari. Ma la probabilità incontrata al tavolo della roulette non riflette alcun aspetto fondamentale del funzionamento dell'universo. La meccanica quantistica, invece, fa entrare la probabilità a un livello molto piú profondo. Secondo Born - e piú di cinquant'anni di esperimenti sembrano confermarlo - la natura ondulatoria della materia implica che la materia stessa debba essere descritta in termini probabilistici. Nel caso di oggetti macroscopici come una tazzina da caffè o il disco della roulette, la formula di de Broglie ci dice che l'aspetto ondulatorio non è sostanzialmente apprezzabile e che quindi la probabilità associata può essere del tutto ignorata. Ma a livello microscopico, sappiamo che non possiamo fare nient'altro che assegnare a un elettrone una probabilità di trovarsi in un determinato punto.

L'interpretazione probabilistica ha il vantaggio che lascia fare all'onda di un elettrone quello che solitamente f anno le onde - come sbattere contro un ostacolo e formare figure di interferenza - senza che l'elettrone medesimo debba essere smembrato. La particella non è «spalmata » qua e là, ma esistono molti posti dove essa si *potrebbe* trovare con probabilità non nulla. Nella pratica questo significa che se ripetiamo piú volte in maniera identica un particolare esperimento in cui dobbiamo misurare la posizione di un elettrone, otterremo una grande varietà di risultati dipendenti dalla sua onda di probabilità. Se l'ampiezza di quest'onda (anzi, il quadrato dell'ampiezza) è il doppio nel punto A rispetto al punto B, in una sequenza di misurazioni ripetute troveremo l'elettrone due volte piú spesso in A che in B. Non possiamo prevedere l'esito preciso della misurazione, ma al massimo la probabilità che risulti un certo valore.

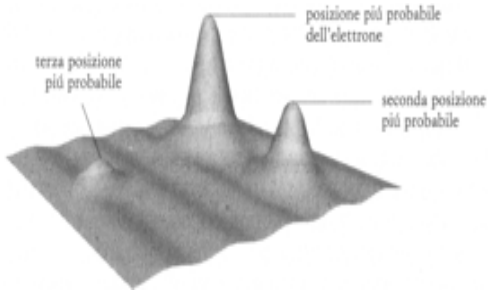

Figura 4.9.

L'onda associata a un elettrone è piú ampia nei punti in cui è maggiore la probabilità di trovare l'elettrone medesimo ed è piú bassa là dove questa probabilità è minore.

Anche con questi limiti, se riusciamo a determinare matematicamente la forma esatta delle onde di probabilità, possiamo sottoporre a test le loro previsioni ripetendo un esperimento molte volte, e quindi misurando la probabilità di ottenere un risultato o un altro. Pochi mesi dopo de Broglie, Schródinger fece un passo decisivo in questa direzione trovando l'equazione che governa la forma e il comportamento delle onde di probabilità, *o funzioni d'onda,* come furono battezzate. Non ci volle molto perché l'equazione di Schródinger e l'interpretazione probabilistica fossero utilizzate per fare previsioni estremamente precise e azzeccate. Il 1927, dunque, è l'anno della perdita dell'innocenza. Erano finiti i tempi in cui un universo a orologeria governava i moti di corpi il cui destino era determinato per sempre. L'universo della meccanica quantistica è sempre governato da rigorosi formalismi matematici, che però ci possono dire solo la probabilità con cui un evento futuro potrà accadere, non quale sarà il futuro.

Per molti, questa conclusione era inaccettabile. Einstein era uno di loro. Pronunciando una delle frasi piú celebri della storia della fisica, egli disse ai partigiani dei quanti che « Dio non gioca a dadi con l'Universo ». Secondo lui, la probabilità era entrata nella storia della fisica per una ragione analoga a quella per cui entra nei casinò: l'incompletezza di fondo dei nostri ragionamenti. Il futuro non può includere elementi casuali e la fisica dovrebbe saper dire come l'universo si evolve, non solo la probabilità che un certo tipo di evoluzione abbia luogo. Ma una grande quantità di esperimenti - molti dei quali eseguiti dopo la sua morte - ci conferma che Einstein aveva torto. Come ha detto Stephen Hawking, «Einstein era confuso, non la meccanica quantistica».[6] Stephen Hawking, conferenza pronunciata al « Symposium on Gravity, Black Holes, and String Theory», Amsterdam, *2* 1 giugno *1997.*

Ciò nonostante, il dibattito sull'interpretazione della meccanica quantistica non accenna ad attenuarsi. Tutti concordano sull'uso pratico delle equazioni, ma le opinioni divergono sul vero significato delle funzioni d'onda, o su come una particella « scelga » il suo futuro tra i tanti possibili, o sul fatto che la particella in realtà non scelga ma si replichi in molti rami diversi, ognuno situato in un universo parallelo. Sono questioni che meriterebbero un libro tutto per sé, e in effetti non mancano eccellenti saggi dedicati all'interpretazione della meccanica quantistica. Ma qualunque sia la nostra posizione al riguardo, è certo che l'universo si basa su principi del tutto estranei alla nostra esperienza quotidiana.

La lezione della meccanica quantistica e della relatività è che indagando gli aspetti piú generali del comportamento del cosmo ci possiamo imbattere in fatti molto diversi dalle nostre aspettative. Chi ha il coraggio di porsi domande fondamentali deve anche dar prova di una grande flessibilità per accettare le risposte che potrebbe ottenere.

8. La formulazione di Feynman.

Richard Feynman è stato uno dei piú grandi fisici teorici dopo Einstein. Pur accettando il nucleo probabilistico della meccanica quantistica, nel secondo dopoguerra egli propose una nuova potente interpretazione della teoria. Dal punto di vista delle previsioni numeriche, la formulazione di Feynman si accorda perfettamente con quella tradizionale, ma è concettualmente diversa. Vediamola attraverso l'esperimento a due fenditure eseguito con gli elettroni.

Ciò che ci turba nella figura 4.8 è il fatto che pensiamo che un elettrone passi attraverso la fenditura destra oppure da quella sinistra, ed è per questo che ci aspetteremmo la figura 4.6, unione delle 4.4 e 4.5. Un elettrone che passa a destra non dovrebbe curarsi di quel che succede a sinistra e viceversa. E invece è cosí: la figura di interferenza che si genera mostra che ci deve essere una sovrapposizione di *qualcosa* che è influenzato da entrambe le fenditure. Per Schródinger, de Broglie e Born il « qualcosa » era l'onda di probabilità (funzione d'onda) associata a ogni elettrone. Come l'acqua della figura 4.7 quest'onda « vede » entrambe le fenditure ed è soggetta alla medesima interferenza. Le zone in cui c'è sovrapposizione di picchi, come quelle dove le onde sono alte nella figura 47, sono zone in cui l'interferenza fa aumentare la probabilità di trovare un elettrone; le zone in cui c'è cancellazione, invece, sono quelle in cui un elettrone non si potrà trovare mai. Riassumendo, gli elettroni sparati uno alla volta colpiscono lo schermo secondo queste modalità appena viste e generano la figura di interferenza della 4.8.

Feynman fece di piú: mise in dubbio l'assunzione di fondo secondo cui un elettrone passa o dalla fenditura destra o da quella sinistra. La cosa potrebbe sembrarvi velleitaria, visto che sembra essere una proprietà indiscutibile. Dopo tutto, mettendovi vicino allo schermo potete benissimo *vedere* in quale fenditura passa ogni singolo elettrone che vi arriva. Sì, ma in questo modo modificate l'esperimento. Per vedere un elettrone dovete fargli qualcosa, ad esempio illuminarlo, cioè colpirlo con dei fotoni. A scale ordinarie i fotoni sono piccole sonde trascurabili che rimbalzano su alberi, quadri e uomini senza sostanzialmente modificare lo stato di moto di questi grandi agglomerati di materia. Ma gli elettroni sono anch'essi piccoli. Per quanto siate cauti nel controllare la fenditura da cui un elettrone è uscito, lo colpirete con fotoni che alterano il suo moto successivo, e questo cambia i risultati dell'esperimento. Infatti, se portate avanti materialmente la cosa, disturbando gli elettroni quel tanto che basta per sapere da dove sono passati, vi ritrovate non piú con la figura 4.8 ma con la 4.6! Secondo la meccanica quantistica, una volta stabilita la traiettoria degli elettroni l'interferenza scompare.

Quindi Feynman sapeva quel che faceva: sebbene la nostra esperienza quotidiana sembri ritenere normale che un elettrone passi da una sola fenditura, gli scienziati sapevano già alla fine degli anni venti che ogni tentativo di verificare questa cosa apparentemente innocua falsa i risultati dell'esperimento.

Feynman affermò che ogni elettrone che raggiunge lo schermo passa in realtà attraverso entrambe le fenditure. Sembra pazzesco, ma non andatevene: le cose stanno per diventare ancora piú folli. Secondo Feynman, ogni elettrone che parte dalla fonte e arriva su un punto dello schermo percorre in realtà *tutte le traiettorie possibili simultaneamente* (alcune di queste sono disegnate nella figura 4. 10). L'elettrone segue una bella linea retta attraverso la fenditura sinistra, ma allo stesso tempo attraverso quella di destra, e simultaneamente si dirige verso la fenditura destra per poi zigzagare verso quella di sinistra. Ma non è finita: contemporaneamente si fa un giretto fino alla galassia di Andromeda, ritorna sulla Terra e decide di passare dalla fenditura destra. E cosí via, all'infinito. L'elettrone «annusa » tutti *i possibili* percorsi che congiungono il suo punto di partenza alla destinazione finale.

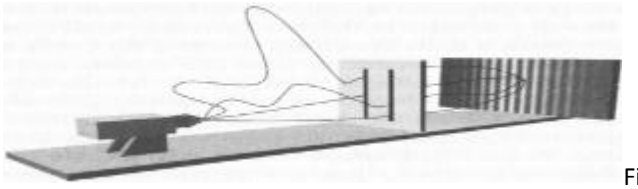

Figura 4. 10 -

Secondo la formulazione di Feynman della meccanica quantistica, si deve pensare che le particelle viaggino da un punto all'altro lungo ogni possibile traiettoria. Qui sono disegnate alcune delle infinite traiettorie possibili di un elettrone che si sposta dalla sorgente allo schermo. Si noti che questo elettrone passa attraverso entrambe le fenditure.

Feynman riuscì ad assegnare a ciascuna di queste traiettorie un numero, in modo che facendone la media il risultato fosse identico a quello calcolato con le funzioni d'onda. Nella sua formulazione, quindi, non è necessario

associare un'onda di probabilità a un elettrone, ma si deve fare qualcosa di altrettanto bizzarro: la probabilità che un elettrone - visto sempre come una particella - arrivi in un punto dello schermo è data dall'effetto combinato di tutti i possibili modi di arrivarci. Questo metodo è noto come «somma sui cammini» (o «integrale di Feynman»).[7] E' utile notare che dalla formulazione di Feynman si può derivare la versione basata sulle funzioni d'onda e viceversa; le due formulazioni sono quindi del tutto equivalenti. Comunque sia, i concetti, il linguaggio e le interpretazioni sono molto diversi, anche se le conclusioni sono le stesse.

A questo punto la vostra educazione classica traballa: come può un elettrone percorrere simultaneamente tutte le traiettorie (che sono infinite) ? Sembra una protesta legittima, ma la meccanica quantistica - che è la fisica del nostro universo - vi chiede di tenere in sospeso le vostre obiezioni pedestri. I risultati dei calcoli svolti con questo metodo concordano con quelli ottenuti con le funzioni d'onda, e quindi sono confermati sperimentalmente. Lasciate che sia la natura a dire come si comporta, e quello che è sensato o meno. Come scrisse Feynman: «La meccanica quantistica dice che la natura è assurda dal punto di vista del senso comune. E concorda pienamente con gli esperimenti. Quindi spero che accetterete la natura per quello che è: assurda».[8] Cfr. Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter,* Princeton University Press, Princeton *1988, p. io* [trad. it. *QED:La strana teoria della luce e della materia,* Adelphi, Milano *1989, p.* 151.

Ma la natura può essere stravagante quanto vuole a scala microscopica, l'importante è che ci consenta di recuperare una prospettiva più familiare nel mondo macroscopico. A questo scopo, Feynman dimostrò che applicando il suo metodo a corpi pesanti - palline, aerei, pianeti ecc. - i numeri assegnati alle varie traiettorie fanno sì che queste si cancellino tutte, tranne una, quando sono combinate. E l'unica traiettoria che rimane è proprio quella calcolata secondo le leggi del moto di Newton. Ecco perché nella vita quotidiana ci sembra che gli oggetti seguano un cammino univoco e prevedibile dal punto di partenza a quello di arrivo. Per i corpi microscopici, invece, molti sono i percorsi che possono contribuire a stabilire il moto, come accade nell'esperimento delle due fenditure. Non possiamo quindi affermare che un elettrone passa solo attraverso una fenditura: la formulazione di Feynman e la figura di interferenza che si forma sono lì a testimoniarcelo.

Come varie letture critiche di un libro o di un film possono (o meno) aiutarci a capire i vari aspetti dell'opera, lo stesso accade per le interpretazioni della meccanica quantistica. Anche se le loro conclusioni quantitative sono identiche, la formulazione di Feynman e la teoria delle funzioni d'onda ci forniscono due modi diversi per capire come stanno le cose. Come vedremo, in certe situazioni l'una o l'altra possono esserci preziose.

9. Stranezze quantistiche.

Ormai dovreste avere un'idea del modo straordinariamente nuovo in cui funziona l'universo secondo i dettami della meccanica quantistica. Se ancora non state provando la vertigine di cui Bohr parlava sopra, quest'ultimo paragrafo dovrebbe perlomeno darvi qualche brivido.

Molto piú di quanto non avvenga per la relatività, è difficile capire in modo viscerale la meccanica quantistica - bisognerebbe pensare come una creatura nata e vissuta nel mondo microscopico. C'è un aspetto, però, che può fare da guida all'intuizione, perché è il punto centrale che differenzia la nuova fisica da quella classica. Si tratta del *principio di indeterminazione,* scoperto da Werner Heisenberg nel *1927.*

Tutto nasce da un'obiezione a cui forse avete già pensato. Abbiamo visto che se cerchiamo di vedere attraverso quale fenditura passa un elettrone (cioè la sua posizione) disturbiamo il suo stato di moto successivo (cioè la sua velocità). Nel mondo macroscopico noi possiamo accertarci della presenza di qualcuno sia sfiorandolo sia assestandogli una randellata sulla schiena; perché non fare lo stesso a livello microscopico, cercando di determinare la posizione di un elettrone con un «tocco» piú leggero in modo da avere meno impatto sul suo moto? Dal punto di vista della fisica classica questo è possibile: basta usare una luce molto fioca (e quindi un rivelatore piú sensibile) per osservare l'esperimento. Ma la meccanica quantistica ci mostra che questo ragionamento è sbagliato. Diminuendo l'intensità della luce facciamo decrescere il numero di fotoni emessi. Se arriviamo al punto limite in cui emettiamo un fotone alla volta, non possiamo fare piú nulla per ridurre la luce, se non spegnerla. Dunque ci sarà sempre qualche fotone, e ci sarà un limite fondamentale - dato dalla meccanica quantistica - alla «gentilezza» del nostro tocco. Misurando la posizione di un

elettrone causiamo sempre una qualche perturbazione nel suo moto.

Forse c'è una scappatoia. La legge di Planck ci dice che l'energia di un fotone è proporzionale alla sua frequenza. Usando fotoni di frequenza sempre minore (e dunque onde sempre piú lunghe) dovremmo produrre fotoni dal tocco sempre piú lieve. Ma ecco l'inghippo: quando usiamo un'onda contro un corpo, l'informazione che ne riceviamo è sufficiente a determinare la posizione del corpo stesso *con un margine d'errore uguale alla lunghezza d'onda.* Per capire questo fatto fondamentale, provate a pensare a un grande scoglio solitario sommerso di poco. Le onde che arrivano dal mare aperto sono inizialmente un treno ordinato di oscillazioni dell'acqua in verticale; dopo essere passate sopra lo scoglio il loro moto non è piú regolare - segno della presenza di un fattore di disturbo. Le singole onde sono le unità minime di misurazione, come le tacche su un righello: dal loro comportamento dopo l'impatto possiamo determinare la posizione dello scoglio solo con un margine d'errore dato dalla loro estensione. I fotoni sono, piú o meno, come le singole onde del mare; un fotone quindi rivela la presenza di un corpo solo con la precisione di una lunghezza d'onda.

Eccoci di fronte a un gioco di equilibri quantistici. Se usiamo luce ad alta frequenza (onde corte) riusciamo a localizzare un elettrone con maggiore precisione. Ma questo tipo di luce ha molta energia e quindi disturba maggiormente il moto del bersaglio. Al contrario, con luce a bassa frequenza (onde lunghe) minimizziamo l'effetto di disturbo sul moto, a scapito però della precisione di misura. Heisenberg riuscì a quantificare questo fatto con una formula in cui si mettono in relazione la precisione con cui si misura la posizione e quella con cui si misura la velocità. In accordo con quanto visto finora, le due quantità sono inversamente proporzionali: aumentare la precisione con cui si conosce la posizione diminuisce quella con cui si conosce la velocità e viceversa. Cosa molto importante, Heisenberg dimostrò che questo « mutuo scambio di precisione» è un fatto fondamentale che rimane vero qualunque sia lo strumento usato o la procedura impiegata. Nella teoria di Newton, come in quella di Einstein, il moto di un corpo è descritto completamente quando è nota la sua posizione e la sua velocità; qui invece, a livello microscopico, queste due caratteristiche non possono essere note entrambe con esattezza - e quanto piú accuratamente se ne conosce una quanto meno accuratamente si conosce l'altra. Questa è una proprietà di *tutta* la materia, non solo degli elettroni.

Einstein cercò di limitare questo rovesciamento della fisica classica sostenendo che, sebbene sia vero che la nostra *conoscenza* di posizione e velocità è soggetta a restrizioni, in realtà la particella *possiede* una sua posizione e velocità definita, proprio come si è sempre pensato. Ma negli ultimi anni le ricerche capitanate dal fisico teorico John Bell e i risultati ottenuti dall'équipe del fisico sperimentale Alain Aspect mostrano in modo convincente che Einstein si sbagliava. La frase «la particella in esame si trova in una tale posizione e ha una tale velocità» è priva di senso: una simile asserzione non può essere verificata sperimentalmente, come abbiamo visto prima, e contraddice altri risultati piú recenti.

Se mettete un singolo elettrone in una scatola e cominciate a far avvicinare le pareti per cercare di catturare la sua posizione con maggiore precisione, lo vedrete diventare man mano piú frenetico. Come se avesse una crisi claustrofoba, l'elettrone si metterebbe a rimbalzare sulle pareti con velocità sempre piú elevate e imprevedibili. La natura non permette che i suoi costituenti siano stretti all'angolo. Nel bar «H-tagliato», dove per uno strano caso *h* è molto piú grande che nel mondo reale e quindi gli oggetti quotidiani sono soggetti agli effetti quantistici, i cubetti di ghiaccio si agitano perché soffrono della medesima claustrofobia. Qui siamo nel campo della fantascienza - h in realtà è incredibilmente piccolo - ma comportamenti come questi sono caratteristici del mondo microscopico. Le particelle diventano sempre piú frenetiche quando sono sondate e confinate in piccole porzioni di spazio.

Il principio di indeterminazione è anche alla base di uno sconcertante fenomeno noto come *effetto tunnel quantistico.* Se sparate un pallino di plastica contro un muro di cemento spesso tre metri, la fisica classica conferma ciò che l'istinto già vi dice: il pallino rimbalza. Questo perché non ha abbastanza energia per penetrare un oggetto cosí resistente. Ma a livello microscopico, la meccanica quantistica dimostra senza dubbio che le funzioni d'onda - cioè le onde di probabilità associate delle particelle che costituiscono il pallino - hanno tutte un pezzetto che *trapassa il* muro. Quindi c'è una piccola probabilità, diversa da zero, che il pallino passi attraverso il bersaglio. Com'è possibile? Torniamo al principio di indeterminazione.

Immaginate di essere completamente al verde e di ricevere la notizia che un vostro lontano parente è passato a miglior vita lasciandovi erede di un'immensa fortuna. Il problema è che dovete andare a reclamare l'eredità subito e non avete i soldi per il biglietto aereo. Spiegate la situazione agli amici: se solo potessero aiutarvi prestandovi del denaro, al vostro ritorno sareste in grado di ricompensarli generosamente. Ma sembra che nessuno abbia un soldo. Vi ricordate

improvvisamente che un vostro amico lavora per una linea aerea; lo chiamate e gli chiedete di farvi temporaneamente credito. Ma lui vi prospetta una soluzione diversa. Le procedure contabili dell'azienda sono strane: se pagate il biglietto entro 24 ore dall'arrivo a destinazione, nessuno potrà mai accorgersi che non l'avete pagato prima della partenza. In questo modo riuscite a diventare ricco.

La contabilità della meccanica quantistica funziona in modo simile. Heisenberg, oltre a dimostrare che esiste una relazione inversa tra la precisione di misura della posizione e quella della velocità, scoprì anche che esiste un legame analogo tra la precisione di misura *dell'energia e* la durata della misura stessa. Secondo la meccanica quantistica, non si può affermare che la tale particella, in un preciso istante, ha una certa quantità di energia, perché misurazioni piú precise di quest'ultima richiedono un tempo sempre maggiore. In altre parole, l'energia di una particella può oscillare anche moltissimo purché l'oscillazione avvenga in un periodo di tempo abbastanza breve. Proprio come la contabilità creativa della linea aerea vi permette di prendere a prestito i soldi per un biglietto purché li ripaghiate presto, la contabilità quantistica permette a una particella di prendere a prestito energia purché la restituisca entro un lasso di tempo determinato dal principio di Heisenberg.

Le equazioni della meccanica quantistica mostrano che maggiore è la quantità di energia necessaria minore è la probabilità che questo prestito improprio avvenga. Ma le particelle microscopiche di fronte a un muro di cemento a volte riescono a compiere un'impresa impossibile secondo la fisica classica: penetrare una regione dello spazio dove inizialmente non hanno l'energia per entrare. Man mano che i corpi che spariamo contro il muro crescono di dimensioni e di complessità, essendo formati da piú costituenti elementari, diminuisce la probabilità dell'effetto tunnel, perché tutte le particelle dovrebbero prendere l'energia necessaria contemporaneamente. Ma la sparizione del sigaro di George, la fuga dei cubetti di ghiaccio dal bicchiere e il passaggio dei nostri eroi attraverso il muro, teoricamente, sono eventi che possono accadere. All'H-tagliato, dove la costante di Planck *h* è molto grande, l'effetto tunnel è cosa di tutti i giorni. Ma nel mondo reale, dove *h* è minuscolo, le equazioni della meccanica quantistica ci assicurano che se vi metteste a sbattere contro un muro ogni secondo, dovreste aspettare piú dell'età attuale dell'universo per avere una buona probabilità di passarci attraverso. Muniti di pazienza (e di vita) eterna, potreste prima o poi trovarvi dall'altra parte.

Il principio di indeterminazione è il cuore della meccanica quantistica. Fatti che ci sembrano cosí ovvi da non essere dubitabili - come «i corpi hanno una posizione e una velocità definita » o « i corpi hanno un'energia definita in ogni istante » - non sono che conseguenze accidentali della piccolezza di h rispetto alla nostra scala abituale. Ma è soprattutto importante perché quando lo si applica alla struttura dello spaziotempo mostra falle insanabili che conducono al terzo, fondamentale conflitto che la fisica ha dovuto affrontare nell'ultimo secolo.

Capitolo quinto

Ci vuole una teoria nuova: relatività generale contro meccanica quantistica

Nel secolo appena trascorso abbiamo fatto enormi progressi nella comprensione dell'universo fisico. Con gli strumenti teorici della meccanica quantistica e della relatività generale siamo in grado di spiegare (e fare previsioni verificabili riguardo a) moltissimi eventi, dalla scala atomica e subatomica a quella delle galassie e oltre, fino alla struttura dell'intero universo. Questo è davvero un risultato eccezionale. E' confortante pensare che una razza di esseri confinati su un pianeta in orbita attorno a una stella qualunque, alla periferia di una comunissima galassia, siano stati capaci di arrivare, con la ragione e l'esperienza, a comprendere le piú misteriose caratteristiche dell'universo. Comunque sia, i fisici non troveranno pace fino a che non avranno svelato i misteri del cosmo al livello piú profondo ed elementare - ciò che Stephen Hawking chiama il primo passo verso la conoscenza della « mente di Dio».[1]Stephen Hawking, A *Brief History of Time,* Bantam, New York *1988, p. 175* [trad. it. *Dal big bang ai buchi neri, Rizzoli,* Milano *1988, p. 197].*

Ci sono molte prove del fatto che né la meccanica quantistica né la relatività generale sono teorie situate a questo «livello zero». I loro domini di applicazione sono molto diversi, e pertanto quasi sempre solo una delle due entra in gioco. Ma in certe situazioni estreme esistono oggetti molto massivi e contemporaneamente molto piccoli ~ ad esempio la regione centrale di un buco nero o l'intero universo al momento del big bang - che richiedono l'applicazione di entrambe le teorie. Quando proviamo a combinarle, però, generiamo una miscela talmente esplosiva da causare una catastrofe: problemi perfettamente sensati e ben posti danno luogo a risultati privi di senso se applichiamo le equazioni delle due teorie insieme. E' tipico, ad esempio, ritrovarsi con l'affermazione che la probabilità quantomeccanica di un certo evento non è, per dire, il 20, il 73 oppure il 91 per cento, ma è *infinita.* Che cosa diavolo vuol dire una «probabilità infinita», quando sappiamo che non ha senso nemmeno un valore maggiore del 100 per cento? Non possiamo non pensare che ci sia qualcosa di seriamente sbagliato. Un esame accurato delle due teorie ci farà capire dove sta il problema.

1. Il cuore della meccanica quantistica.

Quando Heisenberg scoprì il principio di indeterminazione, la fisica imboccò una strada nuova e senza ritorno. Parlare di probabilità, funzione d'onda, interferenza e quanti significa introdurre un modo di vedere la realtà radicalmente diverso. Ma se ci si fermasse qui, un fisico classico irriducibile potrebbe coltivare la speranza che prima o poi tutte queste stranezze condurranno a una nuova teoria non troppo distante dal vecchio modo di pensare. Il principio di indeterminazione, però, spazza via definitivamente l'illusione di poter tornare al passato.

Il principio ci dice in sostanza che l'universo è teatro di frenetiche attività, se lo esaminiamo a scale sempre piú ridotte e su intervalli temporali sempre piú piccoli. Ce ne siamo accorti quando, nel capitolo IV, abbiamo tentato di inchiodare un elettrone: se usiamo onde luminose di frequenza crescente ne misuriamo la posizione con grande precisione, ma a caro prezzo, perché le nostre osservazioni diventano sempre piú invasive. I fotoni ad alta frequenza hanno molta energia e quindi possono dare un bel calcio agli elettroni, cambiandone di molto la velocità. E come se osservassimo una stanza piena di bambini scatenati, di cui possiamo dire in ogni istante la posizione esatta, ma sulle cui velocità e direzioni future non abbiamo alcun controllo. L'impossibilità di sapere allo stesso tempo la velocità e la posizione esatta implica dunque che il mondo microscopico è intrinsecamente turbolento.

Questo esempio dà un'idea chiara della relazione tra indeterminazione e turbolenza, ma rivela solo una parte della storia. Potreste essere portati a pensare, ad esempio, che l'incertezza si manifesti solo quando entriamo in scena noi, goffi osservatori dei fenomeni naturali. Questo è falso. La storiella dell'elettrone che reagisce violentemente se si cerca di confinarlo in una scatola sempre piú piccola ci porta piú vicini alla verità: anche senza l'intervento diretto del fotone devastatore fornito dalla nostra osservazione, la velocità dell'elettrone cambia drasticamente e imprevedibilmente da un momento all'altro. Ma neanche questo esempio svela interamente le straordinarie proprietà microscopiche della natura scoperte da Heisenberg. Anche nella situazione piú inerte immaginabile, come in una regione vuota dello spazio, il principio di indeterminazione riesce a svelare un'insospettata e frenetica attività, attività che aumenta se consideriamo scale ridotte e intervalli di tempo piú piccoli.

Per capire come ciò sia possibile è essenziale ricordare la «contabilità quantistica». Abbiamo visto nel capitolo IV che una particella come un elettrone può prendere in prestito temporaneamente un po' di energia per superare una barriera fisica, proprio come noi possiamo farci prestate del denaro per ovviare a una difficoltà finanziaria. Questo è senz'altro vero, ma in meccanica quantistica l'analogia non si ferma qui. Pensiamo a un individuo affetto da «dipendenza da debito» che passa il tempo a chiedere denaro in prestito agli amici; non solo: piú breve è il periodo per cui chiede i soldi, maggiore è la somma. Tutto il giorno, con maniacale concentrazione, non fa che prendere in prestito e ripagare debiti, a volte dopo pochi minuti. Come accade a chi investe in borsa nei giorni piú frenetici, la somma di denaro che il nostro fanatico si trova in tasca cambia drasticamente di minuto in minuto; ma alla fine della giornata si ritrova sempre senza un soldo in piú o in meno di quanti ne aveva al mattino.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg ci dice che qualcosa di simile accade nel mondo microscopico: un perpetuo e frenetico trasferimento di energia e quantità di moto. Energia e quantità di moto, infatti, sono *incerte* anche in regioni vuote, come una scatola chiusa ermeticamente in cui si sia fatto il vuoto; possono oscillare tra quantità che diventano sempre piú grandi al diminuire delle dimensioni della scatola e dell'intervallo temporale considerato. E come se la regione di spazio in questione fosse anch'essa «debito-dipendente», alla costante ricerca di energia e quantità di moto, che chiede in prestito all'universo per poi ripagarlo subito dopo. Ma chi può partecipare a questo scambio in una regione vuota dello spazio? Tutti e tutto, letteralmente. L'energia (cosí come la quantità di moto) è una moneta facilmente convertibile, grazie alla famosa formula E = mc2. Quindi un'oscillazione energetica sufficientemente ampia può provocare, ad esempio, la momentanea apparizione di un elettrone e del suo compagno nell'antimateria, il positrone, anche se la regione spaziale era inizialmente vuota! Poiché il debito energetico deve essere rapidamente saldato, queste particelle si annichileranno dopo un attimo, restituendo l'energia utilizzata per la loro creazione. Lo stesso vale per tutte le altre forme che l'energia e la quantità di moto possono assumere: creazione e annichilazione di altre particelle, oscillazioni dei campo elettromagnetico, di quello debole e di quello forte, e cosí via. Secondo la meccanica quantistica l'universo a scala microscopica è un'area brulicante di vita e di attività frenetiche. Come disse lo spiritoso Feynman: «Creazione e annichilazione, creazione e annichilazione: che spreco di tempo ».[2] Richard Feynman, citato in Timothy Ferris, *The Whole Sbebang,* Simon&Schuster, NewYork *1997, P- 97*

Poiché prestiti e restituzioni in media si cancellano gli uni con gli altri, una regione vuota dello spazio sembra inerte se misurata a scale piú grandi. Ma grazie al principio di indeterminazione sappiamo che questa media macroscopica nasconde un'incessante attività microscopica.

[3] Nel caso non siate ancora convinti del fatto che qualcosa possa accadere in una regione vuota dello spazio, è importante sottolineare che il principio di indeterminazione pone un limite alla « vuotezza » nelle regioni spaziali, il che modifica la nostra idea comune di « vuoto ». Ad esempio, applicando il principio alle perturbazioni ondulatorie in un campo (come un'onda elettromagnetica che viaggia nel campo elettromagnetico) si scopre che l'ampiezza dell'onda e la velocità con cui questa cambia sono soggette alla stessa relazione inversa vista per la posizione e la velocità di una particella: con maggiore precisione specifichiamo l'una, meno possiamo dire dell'altra. Quando affermiamo che una regione è vuota, intendiamo - tra le altre cose - che nessuna onda la sta attraversando, e che tutti i campi hanno valore zero. Con un linguaggio un po' impreciso ma efficace, possiamo riformulare la cosa nel modo seguente: tutte le onde che passano in quella regione hanno ampiezza uguale esattamente a zero. Ma per il principio di indeterminazione, se conosciamo l'ampiezza esatta la sua velocità di cambiamento ci è del tutto sconosciuta; e se l'ampiezza cambia, allora in un momento successivo non sarà piú uguale a zero, anche se la regione rimane « vuota». In *media il* campo sarà nullo, perché in alcuni punti avrà valori positivi e in altri negativi, e quindi l'energia totale media della regione non cambia. Ma questa è solo una media. Per il principio di indeterminazione l'energia fluttua sempre - anche in una regione vuota - e lo fa sempre piú man mano che restringiamo la regione spaziale e l'intervallo temporale di esame. Grazie alla formula E = mc2,

l'energia coinvolta in queste fluttuazioni momentanee può essere convertita nella creazione momentanea di particelle e antiparticelle, che si annichilano con grande rapidità per evitare che l'energia media cambi.

Come vedremo tra poco, questa frenesia è il motivo per cui meccanica quantistica e relatività generale non riescono a fondersi in una teoria unica.

2. La teoria quantistica dei campi.

Negli anni trenta e quaranta la pattuglia dei fisici teorici, guidata da Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga e Feynman - giusto per fare qualche nome, - si dannò l'anima alla ricerca di un formalismo matematico in grado di rendere conto di questa turbolenza microscopica. Si scoprì presto che l'equazione d'onda di Schródinger, vista nel capitolo IV, non era che una soluzione approssimata, che funzionava molto bene se non ci si addentrava troppo in là nel regno microscopico (sia dal punto di vista teorico sia da quello sperimentale), ma che mostrava i suoi difetti superato un certo limite.

Il fatto è che Schródinger aveva ignorato la relatività ristretta nella sua formulazione della meccanica quantistica. In realtà aveva provato a tenerne conto, ma l'equazione a cui era approdato non concordava con alcuni dati sperimentali riguardanti l'idrogeno. Questo lo spinse a seguire la venerata tradizione del *divide et impera:* piuttosto che tentare in un balzo solo di riunire tutto quanto si conosce sul mondo fisico in un'unica teoria, è spesso preferibile suddividere il problema in tanti piccoli passi, ognuno dei quali incorpora alla teoria le nuove acquisizioni della ricerca. Dunque Schródinger trovò una soluzione che teneva conto della dualità onda-particella (allora già verificata sperimentalmente) ma non prese in considerazione, in un primo tempo, la relatività ristretta.[4] Anche se l'equazione originale di Schródinger - quella che tentava di includere la relatività ristretta - non descriveva con precisione le proprietà quantomeccaniche dell'elettrone nell'atomo di idrogeno, ci si rese presto conto che poteva essere applicata in altri contesti, cosa che avviene anche oggi. Comunque, quando Schródinger pubblicò la sua equazione relativistica, Oskar Klein e Walter Gordon l'avevano già preceduto; ecco perché la versione relativistica è nota come « equazione di Klein-Gordon».

Ben presto, però, ci si rese conto che la relatività era essenziale nella formulazione di una teoria quantistica. Per comprendere i motivi dell'agitazione microscopica si deve tener presente che l'energia si può manifestare in moltissimi modi - una nozione che discende dal famoso proclama relativistico E = mc2. Trascurando la relatività ristretta, Schródinger aveva sorvolato sulla malleabilità della materia, dell'energia e del moto.

I primi tentativi di pervenire a una teoria quantistica relativistica si concentrarono sulla forza elettromagnetica e sui suoi effetti sulla materia. Da una serie di indizi sperimentali nacquero cosí le basi dell'*elettrodinamica quantistica.* Questa è il primo esempio di una *teoria di campo quantistica relativistica* (di solito, per brevità, si omette l'ultimo aggettivo). E' «di campo» perché inserisce le idee della meccanica quantistica all'interno della nozione classica di campo (in questo caso, il campo elettromagnetico di Maxwell); «quantistica» perché gli aspetti probabilistici e il principio di indeterminazione fanno parte delle assunzioni di partenza; infine è «relativistica» perché tiene conto degli effetti della relatività. (Se volete un'immagine visiva di un campo quantistico potete senz'altro pensare a un campo classico - il tipico reticolato di linee di forza che permea lo spazio - però con due varianti. Innanzitutto, il campo è formato non da linee ma da elementi parcellizzati, come i fotoni; poi, dovete pensare che l'energia, o meglio le masse e i moti delle particelle, cambino incessantemente saltando da un campo quantistico all'altro al passare del tempo e al variare dello spazio).

L'elettrodinamica quantistica è probabilmente la teoria piú precisa che sia mai stata formulata. Un esempio dei suoi successi viene dal lavoro di Toichiro Kinoshita, un fisico della Cornell University che negli ultimi trent'anni ha sondato ogni aspetto della teoria per calcolare certe proprietà speciali degli elettroni. I suoi calcoli riempiono migliaia di pagine e hanno richiesto l'intervento dei computer piú potenti al mondo per essere completati. Ma ne è valsa la pena: le previsioni teoriche fornite dal suo lavoro sono state verificate sperimentalmente con una precisione di una parte su un miliardo. Questa concordanza tra teoria e realtà è assolutamente sorprendente. Grazie all'elettrodinamica quantistica i fisici hanno confermato il ruolo del fotone come «particella minima di luce», e ne hanno disvelato le interazioni con tutte le particelle cariche, come gli elettroni, all'interno di un formalismo matematico convincente, completo e capace di fornire previsioni.

Questi trionfi spinsero altri ricercatori, negli anni sessanta e settanta, a battere strade simili per arrivare a teorie quantistiche delle altre tre forze, la debole, la forte e la gravitazionale. Per le prime due, la strategia si rivelò

straordinariamente felice. Analogamente all'elettrodinamica quantistica, si costruirono due teorie quantistiche di campo dette *cromodinamica quantistica* e *teoria elettrodebole quantistica.* «Cromodinamica quantistica» è solo un nome colorito per quella che dovrebbe essere logicamente la «dinamica quantistica della forza forte», e non nasconde significati particolari. Invece il termine «elettrodebole» riassume in sé una delle conquiste piú importanti nell'ambito delle ricerche sulle forze della natura.

Sheldon Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg sono stati insigniti del premio Nobel per aver scoperto che la forza debole e quella elettromagnetica sono *unificate* in modo naturale nella loro descrizione teorica come campi quantistici, anche se le loro manifestazioni sembrano del tutto separate nel mondo ordinario. La forza debole, dopo tutto, svanisce non appena si lascia il mondo subatomico, mentre quella elettromagnetica ha cospicue manifestazioni macroscopiche: la luce, i segnali radio, la televisione, i raggi X ecc. Ciò nonostante, Glashow, Salam e Weinberg hanno dimostrato che a temperature ed energie molto elevate -come quelle presenti una frazione di secondo dopo il big bang - le due forze si *dissolvono* l'una nell'altra, assumono caratteristiche che le rendono indistinguibili e danno origine a un campo che si chiama precisamente *elettrodebole.* Quando la temperatura cala, come è successo costantemente dopo il big bang, le due forze si *cristallizzano* in modi diversi a partire dalla loro forma comune - attraverso un processo di *rottura di simmetria* che descriveremo piú avanti - e quindi appaiono distinte nel freddo universo in cui oggi ci troviamo.

Ricapitolando, alla fine degli anni settanta i fisici erano in possesso di una descrizione quantistica sensata e valida di tre delle quattro forze fondamentali (la forte, la debole e l'elettromagnetica), e sapevano che due di queste tre (la debole e l'elettromagnetica) avevano un'origine comune (la forza elettrodebole) . Negli ultimi vent'anni questo scenario il comportamento di questi campi e le loro interazioni con le particelle materiali - è stato sottoposto a una serie impressionante di verifiche sperimentali. La teoria ne è sempre uscita a testa alta. I fisici sperimentali hanno misurato 19 parametri di base (le masse delle particelle nella tabella 1.1, le loro cariche mostrate nella nota i del capitolo I, le intensità relative delle tre forze non gravitazionali nella tabella 1.2, e altri numeri di cui non abbiamo bisogno qui), i teorici li hanno inseriti nelle loro teorie quantistiche di campo per le forze forte, debole ed elettromagnetica, e su questa base hanno fatto svariate previsioni sul comportamento del microcosmo: i risultati sperimentali concordano con la teoria in modo spettacolare. Questo è vero fino ad energie capaci di sbriciolare la materia in pezzetti grandi un miliardesimo di miliardesimo di metro che è l'attuale limite della tecnologia. Per questi motivi, i fisici raggruppano le tre teorie e le descrizioni delle tre famiglie di particelle materiali in quello che hanno battezzato *modello standard* della fisica delle particelle.

3. Le particelle mediatrici.

Secondo il modello standard, esistono per la forza debole e per quella forte particelle analoghe al fotone del campo elettromagnetico. Come abbiamo visto brevemente nel capitolo I, i costituenti elementari della forza forte sono i gluoni, e quelli della forza debole i *bosoni di gauge deboli (o piú precisamente i bosoni W e quelli Z*). Queste particelle non hanno struttura interna: nel modello standard sono «elementari» alla stessa stregua di quelle appartenenti alle tre famiglie di particelle materiali.

Fotoni, gluoni e bosoni deboli sono responsabili dei meccanismi microscopici grazie ai quali le rispettive forze si trasmettono. Ad esempio, il fatto che due particelle con carica elettrica dello stesso segno si respingono può essere interpretato in termini di campo: ogni particella è circondata da una «nebbia» di «essenza elettrica» e la forza che avverte deriva dalla repulsione tra queste nuvole di campo elettrico. Ma la descrizione precisa a livello microscopico di come questo avvenga è un po' diversa. Un campo elettromagnetico è composto da uno sciame di fotoni; l'interazione tra due particelle cariche deriva dal fatto che queste si « sparano » fotoni in continuazione. Se due pattinatori sul ghiaccio cominciano a lanciarsi addosso delle palle pesanti, il loro moto ne sarà senz'altro influenzato: piú o meno lo stesso accade a due particelle cariche che si lanciano questi piccoli pacchetti di luce.

Ciò che non va nel modello dei due pattinatori è che la loro interazione è sempre repulsiva, perché lo scambio di palle li fa allontanare. Invece due particelle di carica opposta, che interagiscono sempre con lo scambio dei fotoni, finiscono per attrarsi. E' come se il fotone non sia un trasmettitore di forza puro e semplice, ma piuttosto il latore di un *messaggio* che indica al ricevente come rispondere alla forza: nel caso di due cariche identiche il fotone porta il cartello «allontanatevi »; viceversa per due cariche opposte il messaggio è « avvicinatevi ». Ecco perché il fotone è talvolta detto

particella mediatrice (o messaggera) della forza elettromagnetica. Lo stesso accade per i gluoni e i bosoni di gauge deboli, che sono le particelle mediatrici delle forze forte e debole. La forza nucleare forte tiene i quark ben impaccati dentro protoni e neutroni, e lo fa tramite uno scambio di gluoni tra i vari quark. Idem per i bosoni della forza debole, che è responsabile del cosiddetto decadimento beta.

4. La simmetria di gauge.

Vi sarete accorti che la gravità fa la parte dell'intruso nella nostra descrizione delle teorie quantistiche delle forze. Visto il successo ottenuto con le altre tre, potreste pensare che anche con la gravitazione si dovrebbe seguire la stessa strada, alla ricerca di una teoria quantistica in cui il piú piccolo pacchetto di forza sarebbe rappresentato dal *gravitone,* particella mediatrice del campo gravitazionale. Sembrerebbe una strategia molto opportuna, perché la descrizione quantistica delle tre forze non gravitazionali rivela un'allettante somiglianza con una proprietà della gravità che abbiamo incontrato nel capitolo III.

Ricorderete che la gravità ci permette di affermare che tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, sono sullo stesso piano. Anche quelli che sembrano in moto accelerato possono sostenere di essere a riposo, dal loro punto di vista, perché possono attribuire la forza che avvertono a un campo gravitazionale. In questo senso, la gravità impone la simmetria, perché assicura l'equivalenza di tutti i possibili punti di osservazione e di tutti i sistemi di riferimento. Anche le altre tre forze impongono qualche tipo di simmetria, anche se il discorso in questo caso si fa molto piú astratto.

Per avere un'idea di base di queste complesse simmetrie, vediamo un esempio fondamentale. Come abbiamo visto nella nota 1 del capitolo I, i quark possono assumere tre « colori » (rosso, verde e blu, anche se queste etichette fantasiose non hanno alcuna relazione con i colori intesi nel nostro solito senso visivo), che determinano la loro risposta alla forza forte proprio come fanno le cariche elettriche per la forza elettromagnetica. I dati sperimentali mostrano che c'è una simmetria, nel senso che le interazioni tra due quark dello stesso colore (rosso con rosso, verde con verde, blu con blu) sono tutte identiche, e lo stesso vale per le interazioni tra quark di colori diversi (rosso con verde, verde con blu, blu con rosso). Ma c'è di piú. Se i tre colori dei quark fossero trasformati in un modo particolare (nel nostro linguaggio poetico, il rosso, verde e blu possono diventare giallo, indaco e violetto), e anche se questa trasformazione avvenisse in modo diverso da momento a momento o da punto a punto, le interazioni fra i quark non ne sarebbero toccate. Cosí come diciamo che una sfera ha simmetria di rotazione perché ha sempre lo stesso aspetto in qualunque modo la giriamo o da qualunque angolo la vediamo, affermiamo che l'universo ha una simmetria associata alla forza forte: le leggi fisiche sono inalterate da questi spostamenti di carica forte. Per ragioni storiche, si dice che questa è una simmetria di gauge.

[5] Per i lettori esperti: osserviamo qui che i principi di simmetria della fisica delle particelle elementari si fondano sulla teoria dei gruppi, segnatamente dei gruppi di Lie. Le particelle sono classificate secondo le rappresentazioni di vari gruppi e le equazioni che governano la loro evoluzione temporale devono rispettare le corrispondenti trasformazioni di simmetria. Il gruppo di simmetria per la forza forte è SU(3) - che è l'analogo del gruppo delle rotazioni tridimensionali ma agisce su uno spazio complesso - e i tre colori di una data specie di quark si trasformano in una rappresentazione tridimensionale. La trasformazione dal rosso-verde-blu al giallo-indaco-violetto di cui si parla nel testo è una trasformazione indotta dall'azione di SU(3) sulle «coordinate di colore» di un quark. In una simmetria di gauge il gruppo di trasformazioni può essere dipendente dalle coordinate spaziotemporali: in questo caso, la «rotazione» dei colori dei quark può variare punto per punto e istante per istante.

Ecco il punto essenziale. Come la simmetria tra tutti i possibili punti di vista della relatività generale richiede l'esistenza della forza gravitazionale, cosí è stato dimostrato che la simmetria di gauge richiede l'esistenza di altre forze (questo è emerso soprattutto dai lavori di Hermann Weyl negli anni venti e di Chen-Ning Yang e Robert Mills negli anni cinquanta). Allo stesso modo in cui un climatizzatore automatico mantiene costanti temperatura, pressione e umidità in una porzione di spazio, compensando perfettamente gli agenti esterni, cosí opportuni campi di forza, secondo Yang e Mills, producono gli stessi aggiustamenti per le cariche di gauge, lasciando inalterate le interazioni tra le particelle. Nel caso della simmetria di gauge, la forza che la mantiene non è che la forza nucleare forte: senza questa, le leggi della fisica cambierebbero a seconda degli spostamenti di colore descritti prima. Questo mostra che, nonostante la gravità e la forza forte abbiano proprietà assai diverse (la prima è enormemente piú debole della seconda, e opera su scale incomparabilmente piú grandi), hanno un compito simile: sono necessarie a far sì che l'universo abbia certi tipi di simmetria. Il discorso può essere ripetuto per la forza debole e quella elettromagnetica, la cui esistenza è legata ad altre

simmetrie di gauge (quella debole e quella elettromagnetica, ovviamente). Tutte le quattro forze, dunque, sono direttamente associate a un tipo di simmetria.

Ciò sembrerebbe di buon auspicio per quanto abbiamo detto all'inizio del paragrafo: per incorporare la meccanica quantistica nella relatività generale dovremmo trovare una teoria quantistica della forza gravitazionale, esattamente come è stato fatto per le altre tre forze. Questo sentiero è stato seguito dalle migliori menti teoriche della fisica negli ultimi anni, ma il terreno si è mostrato scivoloso e il percorso ricco di pericoli: nessuno è mai arrivato alla fine. Vediamo perché.

5. Lo scontro tra relatività generale e meccanica quantistica.

La relatività generale si applica abitualmente a scale astronomiche. In questi ambiti, la teoria di Einstein ci mostra che in assenza di massa lo spazio è piatto, come si vede nella figura 3.3. Per tenere conto anche della meccanica quantistica, dobbiamo ora fare un drastico cambio di scala ed esaminare le proprietà *microscopiche* dello spazio. Illustriamo questo processo nella figura 5. 1, nella quale si vedono alcuni zoom successivi che ingrandiscono regioni sempre piú piccole dell'universo spaziale. All'inizio non succede nulla: i primi tre livelli di ingrandimento ci mostrano che lo spazio mantiene la sua forma di base. Da un punto di vista strettamente classico, le cose dovrebbero rimanere cosí fino a scale arbitrariamente piccole. Ma la meccanica quantistica smentisce radicalmente questa previsione: tutto è soggetto alle fluttuazioni quantistiche inerenti al principio di indeterminazione, anche il campo gravitazionale. Secondo la fisica classica nello spazio vuoto il campo gravitazionale vale zero; ma per la meccanica quantistica questo è solo un valore medio: il valore reale oscilla su e giù per via delle fluttuazioni quantistiche. In piú il principio di indeterminazione ci dice che queste oscillazioni aumentano man mano che concentriamo l'attenzione su regioni sempre piú piccole di spazio. La natura non ama essere circondata: restringere lo spazio non fa che aumentare la frenesia dei cambiamenti.

Poiché il campo gravitazionale si riflette nella curvatura, le fluttuazioni quantistiche si manifestano come distorsioni sempre piú forti della forma dello spazio. Vediamo i primi barlumi di queste anomalie nel quarto livello di ingrandimento della figura 5. 1. Continuando a scendere, nel quinto livello, vediamo che le ondulazioni casuali dello spazio dovute agli effetti quantistici sono cosí pronunciate da non dare piú l'idea di un oggetto geometrico dalla curvatura regolare (come abbiamo visto nel capitolo in con l'analogia della membrana di gomma). Il caos della figura 5.1 in alto ci dà un'idea delle forme irregolari e turbolente assunte dal campo gravitazionale. John Wheeler ha battezzato con il termine *schiuma quantistica* questo guazzabuglio che si incontra nell'esplorazione ultramicroscopica dello spazio (e del tempo): è un mondo per nulla familiare, dove le nozioni convenzionali di destra e sinistra, avanti e indietro, sopra e sotto (e persino prima e dopo) perdono ogni significato. E' a queste scale che incontriamo la incompatibilità di fondo tra relatività generale e meccanica quantistica: *la nozione di geometria spaziale regolare, cardine della relatività generale, a scale molto piccole perde di senso a causa delle violente fluttuazioni quantistiche.* Nel mondo ultramicroscopico i nuclei delle due teorie - il principio di indeterminazione e il modello geometrico dello spaziotempo - sono in conflitto diretto.

Nella pratica questo problema si mostra in modi molto concreti. I calcoli fatti tenendo conto sia delle equazioni della relatività generale sia di quelle della meccanica quantistica danno solitamente lo stesso, assurdo risultato: infinito. Come un bel colpo di righello infertoci da un maestro del passato, il valore infinito è il modo in cui la natura ci dice che stiamo sbagliando di grosso.

[6] Anche durante lo sviluppo delle teorie quantistiche delle tre forze non gravitazionali i fisici si sono imbattuti in calcoli il cui risultato era infinito. Questi «infiniti» - come si è poi capito - possono essere eliminati mediante una tecnica detta *rinormalizzazione.* Le quantità infinite che si incontrano nei tentativi di fusione tra relatività generale e meccanica quantistica sono spie di problemi molto piú gravi, che non possono essere domati con la rinormalizzazione. In tempi recenti ci si è resi conto che l'apparire degli infiniti è indizio del fatto che si sta usando una teoria oltre i limiti della sua applicabilità. Poiché lo scopo ultimo della fisica moderna è trovare una teoria applicabile, in linea di principio, sempre e comunque, questa non dovrà mai fornire risultati infiniti, anche se i calcoli sono relativi a situazioni estreme.

6. Le formule della relatività generale non riescono a domare la ribollente schiuma quantistica.

Osservate però che se torniamo ad occuparci di scale piú consuete (ripercorrendo a ritroso la sequenza della figura 5. 1), le oscillazioni anche piú violente si cancellano l'una con l'altra - allo stesso modo in cui le fluttuazioni finanziarie del nostro debitore maniacale portano in media a un saldo pari a zero - e la geometria regolare dell'universo ritorna. E' la stessa esperienza che si ha di fronte a una figura composta da migliaia di puntini: da lontano le singole particelle di colore si fondono e danno l'impressione di un'immagine normale, con transizioni armoniose tra una zona e l'altra in luminosità e forma. Se vi avvicinate, però, vi accorgete che si tratta solo di un mucchio di puntini separati da spazi bianchi. La natura discreta dell'immagine è apprezzabile solo a distanza molto ravvicinata, mentre è del tutto invisibile se vi allontanate. La stessa cosa accade con la struttura dello spaziotempo, che sembra regolare e liscia se non la osservate con precisione ultramicroscopica. Ecco perché la relatività generale funziona bene su scale spaziali e temporali abbastanza grandi -come quelle rilevanti per le applicazioni astronomiche - ma diventa inconsistente a scale molto piccole. Il dogma della geometria regolare e delle curve lisce è giustificato nel regno del grande, ma crolla nel piccolo a causa delle fluttuazioni quantistiche.

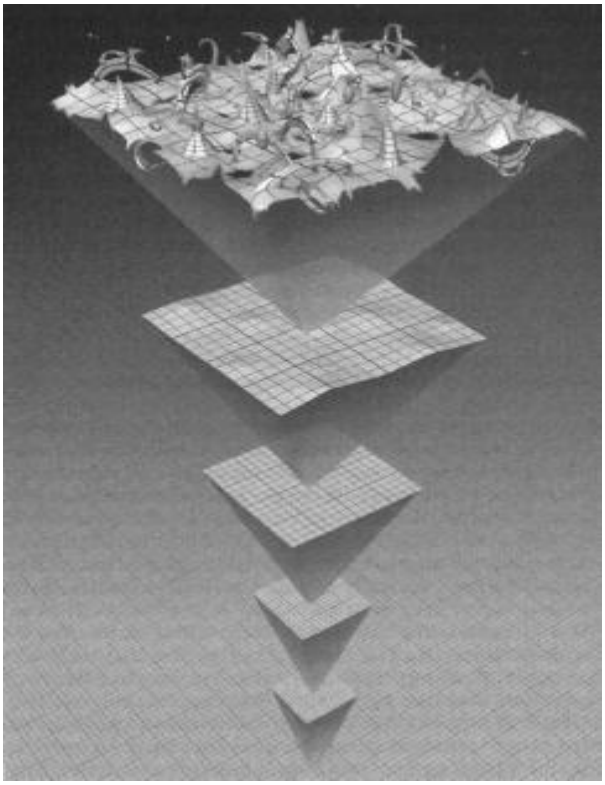

Figura 5. 1 -

Ingrandendo sempre di piú una regione dello spazio, possiamo indagare le sue proprietà ultramicroscopiche. I tentativi di fondere la relatività generale e la meccanica quantistica si scontrano contro l'effervescente schiuma quantistica che si manifesta al piú alto livello di ingrandimento.

I principi fondamentali delle due teorie ci mettono in grado di calcolare approssimativamente la distanza sotto la quale il pernicioso disordine della figura 5. 1 diventa manifesto. La piccolezza della costante di Planck - che governa l'intensità degli effetti quantistici - e la debolezza intrinseca della forza gravitazionale ci portano a un valore detto *lunghezza di Planck,* che è piccolo oltre ogni immaginazione: un milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di centimetro (10-33 cm)

[7] C'è un modo interessante di arrivare alla lunghezza di Planck, basato su un tipo di ragionamento che i fisici chiamano *analisi dimensionale.* Quando una teoria è formulata come un insieme di equazioni, i simboli di queste equazioni devono essere legati ad alcune caratteristiche fisiche, se si vuole che la teoria abbia applicazioni nel mondo reale. In particolare dobbiamo introdurre un sistema di unità, in modo tale da avere una scala di riferimento per interpretare i valori numerici: se il risultato di un calcolo è « 5 », dobbiamo sapere se si tratta di centimetri, metri o anni luce. In una teoria che coinvolge meccanica quantistica e relatività generale la scelta dell'unità viene naturale in questo modo. La

relatività generale dipende da due costanti fisiche, la velocità della luce c e la costante gravitazionale G; la meccanica quantistica dipende essenzialmente dalla costante di Planck ħ. Analizzando le loro dimensioni (c è una velocità, cioè è espressa in unità di spazio divise per unità di tempo, e cosí via) vediamo che la combinazione √ħG/c3 è una misura di lunghezza: infatti è pari a 1,616 x 10-33 cm. Questa è la lunghezza di Planck. Poiché dipende da fattori correlati a gravità, spaziotempo e quanti, è un'unità «naturale » per ogni teoria che tenti di unire relatività generale e meccanica quantistica. Nel testo l'espressione «lunghezza di Planck» è spesso usata in senso approssimato, e indica un ordine di grandezza vicino a 10-33 cm.

Il quinto livello della figura 5. 1, dunque, rappresenta schematicamente cosa accade a scale inferiori alla lunghezza di Planck. Per darvi un'idea della piccolezza, se un atomo fosse ingrandito fino alle dimensioni dell'universo, la lunghezza di Planck sarebbe piú o meno quella di un albero.

Quindi, l'incompatibilità tra relatività generale e meccanica quantistica si manifesta solo in regioni assai esoteriche dell'universo. Vi potreste forse chiedere perché dobbiamo preoccuparcene. A dire il vero, nemmeno la comunità scientifica la pensa tutta allo stesso modo sulla questione. Ci sono fisici che prendono diligentemente nota della cosa, per poi applicare senza indugi le due teorie a scale assai lontane dalla lunghezza di Planck, come richiesto dalle loro ricerche. C'è invece chi è profondamente turbato dal fatto che i due pilastri della fisica siano fondamentalmente incompatibili, anche se ciò si manifesta a scala ultramicroscopica. La contraddizione, dicono, mostra una grave falla nella nostra visione dell'universo. Questo secondo atteggiamento fa leva su una credenza indimostrabile ma profondamente radicata: l'universo può essere descritto e spiegato fino al suo livello piú elementare da una teoria sensata le cui diverse parti si armonizzano perfettamente. Ed è sicuro che molti fisici, indipendentemente da quanto il problema tocchi le loro ricerche specifiche, non possono credere che la nostra piú profonda costruzione teoretica dell'universo consista in un miscuglio matematicamente inconsistente di due parti straordinarie ma incompatibili.

La scienza ha cercato in tutti i modi di modificare la relatività generale o la meccanica quantistica in modo da evitare i problemi; ma per quanto brillanti e ingegnosi, tutti i tentativi sono andati a vuoto.

Fino a quando non è stata scoperta la teoria delle superstringhe.

[8] Nel tentativo di unificare meccanica quantistica e relatività generale, oltre alla teoria delle stringhe, ci sono attualmente altre due linee di ricerca perseguite molto attivamente. Una è la *teoria dei twistor,* la cui invenzione si deve a Roger Penrose, di Oxford. L'altra - ispirata in parte al lavoro di Penrose - è il cosiddetto metodo delle *nuove variabili (new variables), il cui* principale esponente è Abhay Ashtekar della Pennsylvania State University. Nel libro non parleremo di queste teorie; un'ipotesi che trova sempre maggior consenso tra i fisici è che entrambe abbiano una correlazione a livello profondo con la teoria delle stringhe. Forse tutte e tre le strategie si stanno avvicinando pian piano alla stessa soluzione.

Capitolo sesto

Nient'altro che musica: le basi della teoria delle superstringhe

La musica è da sempre una ricca fonte di metafore per chi medita sui misteri del cosmo. Dalla «musica delle sfere» dei pitagorici all'«armonia della natura», spesso invocata nei secoli, l'uomo ha continuato a cercare la melodia del mondo nei moti regolari dei corpi celesti come nelle violente manifestazioni del mondo subatomico. Con le superstringhe, la metafora diventa straordinariamente vera: secondo questa teoria, il mondo microscopico è pieno di piccole corde di violino, i cui modi di vibrazione orchestrano l'evoluzione del cosmo. I venti del cambiamento, in questo scenario, spirano in un mondo soffuso di melodie.

Per contrasto, nel modello standard i costituenti elementari sono puntiformi e non hanno struttura interna. Il modello è assai utile (abbiamo detto che praticamente tutte le sue previsioni sono state verificate fino a ordini di grandezza di un miliardesimo di miliardesimo di metro, che è il limite raggiungibile con le attuali tecnologie), ma non può essere considerato una teoria completa o definitiva, perché non comprende la gravità. Inoltre, se ci addentriamo nel regno delle dimensioni minori della lunghezza di Planck, il modello standard non riesce a incorporare la relatività generale, a causa delle violente fluttuazioni quantistiche che si verificano a quelle scale. Nasce dunque l'esigenza di cercare una teoria ancora piú profonda. Nel 1984 Michael Green, allora al Queen Mary College, e John Schwarz, del California Institute of Technology, trovarono una prima prova convincente del fatto che la teo*ria delle superstringhe* (o delle *stringhe,* per brevità) poteva essere la soluzione del problema.

La teoria delle stringhe cambia in modo inedito e profondo la nostra descrizione teorica delle proprietà ultramicroscopiche dell'universo, modificando la relatività generale di Einstein in un modo - come ci stiamo lentamente accorgendo - tale da renderla del tutto compatibile con le leggi della meccanica quantistica. Per la teoria delle stringhe gli ingredienti fondamentali del mondo non sono particelle puntiformi, ma sottili filamenti unidimensionali - simili ad elastici infinitamente piccoli - che vibrano continuamente. Ma non lasciatevi fuorviare dal nome «stringa»: mentre un comune pezzo di spago è formato da atomi e molecole, gli «spaghi» della teoria sono il cuore stesso della materia, sono gli ingredienti fondamentali delle particelle che compongono atomi, molecole e cosí via. Questi piccoli spaghi sono davvero microscopici - in media quanto la lunghezza di Planck - cosí che *sembrano* puntiformi anche quando esaminati dai piú potenti strumenti a nostra disposizione.

Il semplice fatto di rimpiazzare le particelle puntiformi con le stringhe ha conseguenze rivoluzionarie. Prima di tutto, sembra proprio che in questo modo si riesca a risolvere il conflitto tra relatività generale e meccanica quantistica: come vedremo, il fatto che la stringa abbia un'estensione spaziale è un fattore chiave per armonizzare le due teorie in un unico quadro teorico. In secondo luogo, la teoria delle stringhe è una vera teoria unificata, perché ipotizza che tutta la materia e tutte le forze nascano a partire da un unico costituente di base: le stringhe vibranti, appunto. Infine, come vedremo meglio in seguito, la nuova teoria cambia ancora una volta in modo radicale il nostro modo di intendere lo spazio e il tempo.[1] Il lettore competente si accorgerà che in questo capitolo ci occupiamo solo della teoria *perturbativa*; gli aspetti non perturbativi verranno trattati nei capitoli XII e XIII

1. Breve storia della teoria delle stringhe.

Nel *1968* un giovane fisico teorico chiamato Gabriele Veneziano stava cercando di raccapezzarsi tra vari dati

sperimentali riguardanti la forza nucleare forte. Veneziano era ricercatore al Cern di Ginevra, dove lavorava da qualche anno su questi problemi. Un giorno ebbe un'illuminazione. Anche se sembrava impossibile, si accorse che una formula esoterica escogitata per motivi puramente matematici dal grande Leonhard Euler (Eulero) duecento anni prima - la cosiddetta *funzione beta* di Eulero - sembrava descrivere in un sol colpo un bel po' di proprietà delle interazioni forti. Le osservazioni di Veneziano fornirono un'utile sistemazione matematica della forza forte e furono il trampolino di lancio per molte ricerche, nelle quali si cercava di spiegare grazie alla funzione beta - e alle sue generalizzazioni - la messe di dati collezionata dagli acceleratori di tutto il mondo. C'era però un punto che rendeva la scoperta di Veneziano incompleta. Come una formula imparata a memoria da uno studente che non si rende conto del suo significato, cosí la funzione beta era uno strumento che funzionava senza che nessuno sapesse perché. Nel *1970,* però, i lavori di Yoichiro Nambu, Holger Nielsen e Leonard Susskind rivelarono a tutti quale fosse la fisica nascosta dietro la formula. Modellizzando le particelle elementari come piccole stringhe vibranti unidimensionali, le loro interazioni nucleari potevano essere descritte proprio dalla funzione beta. E se le stringhe sono abbastanza piccole, sono comunque assimilabili a particelle puntiformi, dunque rimangono in accordo con i dati sperimentali.

Questa teoria era semplice e piacevolmente intuitiva, ma dopo non molto tempo ci si accorse che non funzionava: alcuni esperimenti effettuati ad alte energie mostrarono che alcune sue previsioni riguardo alla forza forte erano errate. Era l'epoca in cui si veniva precisando la cromodinamica quantistica, i cui straordinari successi fecero presto abbandonare l'ipotesi delle stringhe.

Quasi tutti i ricercatori pensavano che la teoria delle stringhe fosse stata ormai relegata nel dimenticatoio, ma un manipolo di entusiasti continuò ad occuparsene. Schwarz, per esempio, sentiva che «la struttura matematica della teoria era cosí elegante e aveva cosí tante proprietà miracolose, che doveva per forza indicare qualcosa di molto profondo»

[2] Conversazione con John Schwarz, 23 dicembre *1997.*

Uno dei problemi della teoria era la sua eccessiva, imbarazzante ricchezza. Alcuni modi di vibrazione delle stringhe avevano proprietà analoghe a quelle dei gluoni (confermando cosí la sua pretesa di essere un modello per la forza forte); ma erano previste anche particelle mediatrici *aggiuntive* che sembravano non aver nulla a che fare con le osservazioni sperimentali. Con una mossa ardita, nel *1974* Schwarz e Joél Scherk trasformarono questo vizio in una virtù: mostrarono infatti che queste misteriose particelle avevano esattamente le proprietà che si ipotizzavano per i gravitoni, i mediatori della gravità. Anche se questi «pacchetti minimi» di forza gravitazionale non sono ancora stati osservati, infatti, è comunque possibile fare previsioni precise sulle loro proprietà, proprietà che Schwarz e Scherk trovarono essere tipiche di alcuni modi di vibrazione delle stringhe. Essi sostennero dunque che il primo tentativo di teoria delle stringhe era fallito perché i ricercatori avevano indebitamente ristretto il suo ambito di applicazione. Non si tratta solo di una spiegazione della forza forte, ma di una teoria quantistica che include in sé anche la gravità.[3] Ipotesi simili furono avanzate indipendentemente da Tamiaki Yoneya, Korkut Bardakci e Martin Halpern. Un'altra figura di primo piano fu il fisico svedese Lars Brink.

La comunità scientifica non accolse questo risultato con particolare entusiasmo - anzi, dice Schwarz: « Il nostro lavoro fu universalmente ignorato».[4] ' Conversazione con John Schwarz, *23* dicembre *1997.*

La strada della ricerca era già disseminata di tentativi naufragati di unire gravità e meccanica quantistica; la teoria delle stringhe si era mostrata inadeguata a descrivere anche solo la forza forte, e sembrava ai piú uno spreco di tempo cercare di usarla per obiettivi piú ambiziosi. Peggio ancora, ricerche successive a cavallo tra gli anni settanta e ottanta mostrarono che c'erano complesse incompatibilità tra teoria delle stringhe e meccanica quantistica: la gravità sembrava resistere a ogni tentativo di essere ingabbiata nella descrizione microscopica dell'universo.

Questa era la situazione fino al *1984.* In quell'anno comparve un articolo fondamentale di Green e Schwarz che riassumeva quattordici anni di intenso lavoro, un lavoro ignorato o sottovalutato dalla maggioranza dei colleghi. Essi mostravano che il conflitto tra meccanica quantistica e teoria delle stringhe poteva essere risolto e che la nuova teoria era sufficientemente ampia da comprendere tutte e quattro le forze. Quando l'articolo circolò nella comunità scientifica, torme di fisici delle particelle abbandonarono le loro ricerche in atto per lanciare un assalto in grande stile a quello che sembrava l'ultimo baluardo teorico a protezione dei misteri dell'universo.

Nell'ottobre *1984* iniziavo il dottorato a Oxford. Ero entusiasta delle cose che imparavo: teorie quantistiche di campo, teorie di gauge, relatività generale e cosí via. Però tra gli studenti piú anziani serpeggiava la sensazione che la fisica delle particelle elementari fosse un settore di ricerca senza futuro. Il modello standard regnava incontrastato e i suoi

continui successi sperimentali facevano pensare che la conferma della sua validità fosse solo questione di tempo e di dettagli. Andare oltre il modello standard per affrontare la gravità e magari *spiegare* i dati su cui si basa - 19 parametri che riassumono masse e cariche delle particelle elementari e le intensità relative delle forze, numeri ricavati sperimentalmente ma privi di una giustificazione teorica - era un compito cosí improbo che solo pochi coraggiosi si sentivano di affrontarlo. Sei mesi dopo l'atmosfera in università era del tutto opposta. Il successo di Green e Schwarz era arrivato alle orecchie anche di una matricola come me e il disincanto aveva ceduto il posto all'elettrizzante sensazione di essere nel bel mezzo di un momento storico per la fisica. Molti studenti si misero a studiare giorno e notte tutta la fisica teorica e la matematica (non poca) necessaria per capire la teoria delle stringhe.

Gli anni tra il *1984* e il *1986* sono stati battezzati il periodo della «prima rivoluzione delle superstringhe». In questo lasso di tempo videro la luce in tutto il mondo piú di mille articoli di ricerca dedicati alla teoria. Tutti mostravano in modo stringente che molte parti del modello standard - che erano state scoperte faticosamente in decenni di ricerche - *emergevano in modo naturale* dall'impalcatura della teoria delle stringhe. Come dice Michael Green, «nel momento stesso in cui ci si imbatte in questa teoria cosí ben congegnata e ci si accorge che quasi tutte le scoperte della fisica dell'ultimo secolo saltano fuori con grande eleganza da un punto di partenza cosí semplice, si capisce che è una spanna sopra le altre».[5] Conversazione con Michael Green, 20 dicembre *1997*

Per molti aspetti, inoltre, la teoria delle stringhe fornisce spiegazioni assai piú complete e convincenti del modello standard, come vedremo piú avanti. Tutto ciò convinse molti ricercatori che si era sulla buona strada verso la teoria unificata ultima.

Ciò nonostante, il percorso sì rivelò costellato di ostacoli. Nelle ricerche di fisica teorica è consueto imbattersi in equazioni troppo difficili da risolvere; i fisici però non si fanno troppi problemi e cercano di ricavarne soluzioni approssimate. Nella teoria delle stringhe, però, è spesso arduo *arrivare a scrivere* le equazioni, ragion per cui ci si deve accontentare di versioni semplificate; ed è cosí che ci si trova spesso ad avere soluzioni approssimate di equazioni approssimate. Dopo i primi anni di straordinari successi, durante la prima rivoluzione delle superstringhe, ci si accorse che queste semplificazioni impedivano di rispondere a molte domande fondamentali e bloccavano ogni ulteriore progresso. Senza proposte concrete per superare lo stallo, molti fisici furono vinti dalla frustrazione e tornarono alle loro vecchie ricerche. Per chi resistette, gli anni a cavallo tra gli ottanta e i novanta furono duri. Come un tesoro chiuso in cassaforte, visibile solo attraverso una piccola, allettante fessura, la terra promessa della teoria sfavillava irraggiungibile, senza che nessuno avesse la chiave per liberarla. Lunghi periodi di magra si alternavano a importanti risultati, ma era chiaro a tutti che era necessario arrivare a nuovi metodi per superare le inadeguatezze di quelli approssimati.

Durante il convegno «Strings *1995»,* in un'emozionante conferenza alla University of Southern California, che tenne con il fiato sospeso una fitta platea di fisici di prima grandezza, Edward Witten propose un modo per far compiere alla teoria il passo successivo, dando il via alla « seconda rivoluzione delle superstringhe ». Mentre scrivo, la pattuglia dei teorici sta mettendo a punto una batteria di nuove tecniche che sembrano aggirare gli ostacoli incontrati in precedenza. Le difficoltà che ci attendono sono molte e ci daranno la prova della nostra forza; ma la luce in fondo al tunnel, anche se fioca, sta diventando visibile.

In questo e nei seguenti capitoli parleremo della teoria delle stringhe come è emersa dalla prima rivoluzione e dalle ricerche successive, prima della seconda rivoluzione. Ci occuperemo occasionalmente anche di quest'ultima, per poi trattarne in dettaglio nei capitoli XII e XIII

2. Ritorno agli atomi dei Greci?

Come abbiamo visto all'inizio del capitolo, e come è mostrato nella figura 1.1, la teoria delle stringhe sostiene che se le presunte particelle puntiformi del modello standard fossero esaminate con un livello di dettaglio assai superiore alle nostre attuali capacità, si rivelerebbero formate da un'unica, piccola stringa chiusa vibrante.

Per motivi che saranno chiari tra poco, la lunghezza di una stringa tipo è uguale all'incirca alla lunghezza di Planck, cioè è cento miliardi di miliardi (1020) di volte piú piccola di un nucleo atomico. Non ci sorprende che gli esperimenti attuali non siano in grado di rivelare questa struttura: le stringhe sono microscopiche anche rispetto alle particelle subatomiche. Sarebbe necessario un acceleratore capace di arrivare ad energie miliardi di volte piú intense di quelle finora

realizzate.

Tra poco parleremo delle straordinarie conseguenze di questa ipotesi. Ma prima affrontiamo la domanda fondamentale: di cosa sono fatte queste stringhe?

Ci sono due possibili risposte. Primo, le stringhe sono davvero fondamentali, cioè sono « atomi », « indivisibili », nel senso letterale con cui li intendevano gli antichi Greci. Come costituenti piú piccoli di tutto quanto, rappresentano in un certo senso la fine della corsa - come l'ultima bambolina dentro una matrioska - di tutte le strutture del mondo microscopico. Da questa prospettiva, anche se le stringhe hanno un'estensione spaziale, la questione della loro composizione è senza senso: se fossero fatte di qualcos'altro non sarebbero piú fondamentali. Se trovassimo un loro costituente dovremmo abbandonarle, alla ricerca di qualcosa di ancora piú piccolo. Pensiamo alla lingua scritta: le frasi sono fatte di parole e le parole sono fatte di lettere. Ma da un punto di vista linguistico le lettere non sono fatte di nulla: sono i mattoni indivisibili della lingua scritta; non ha senso parlare della loro composizione. Analogamente, una stringa è solo una stringa, non può essere composta da qualche altra sostanza.

La seconda possibile risposta fa tesoro del fatto che ancora non sappiamo con certezza se la teoria delle stringhe sia corretta, se sia davvero la parola definitiva sulla natura dell'universo. Se è sbagliata, allora possiamo scordarci delle stringhe e dell'irrilevante questione della loro composizione. E pur sempre una possibilità, ma una gran quantità di ricerche ci conforta nel credere che la teoria sia corretta. La storia, però, ci insegna che ogniqualvolta si affinano le nostre tecniche per sondare i misteri della materia, troviamo ingredienti microscopici sempre piú piccoli, che costituiscono un ulteriore livello di base. Quindi, se la teoria delle stringhe non si rivelasse la teoria ultima, potremmo scoprire che le stringhe non sono che un altro strato della cipolla cosmica, uno strato che diventa visibile solo a dimensioni analoghe alla lunghezza di Planck, ma che magari ne contiene altri. Dunque potrebbe darsi che le stringhe siano costituite da elementi ancora piú piccoli. Questa ipotesi è stata avanzata dai teorici, e viene valutata con estrema attenzione. In effetti ci sono allettanti indizi dell'esistenza di una qualche sottostruttura, ma manca una prova convincente. Solo il tempo e la ricerca indefessa potranno dare risposta a tali problemi.

A parte qualche speculazione nei capitoli XII e XV, qui diamo per buona la prima risposta vista sopra, cioè assumiamo per certo che le stringhe siano l'ingrediente piú fondamentale della natura.

3. L'unificazione grazie alle stringhe.

Oltre al fatto che non include la gravità, il modello standard ha un altro grosso difetto: non dà spiegazioni riguardo ai dettagli della sua costruzione. Perché la natura ha scelto proprio la lista di particelle e forze delle tabelle 1.1 e 1.2 ? Perché i 19 parametri che le descrivono hanno proprio quei valori? La sensazione che si tratti di numeri del tutto arbitrari è molto forte. C'è una ragione profonda nascosta dietro questi dati apparentemente casuali, o forse le proprietà dell'universo fisico sono state scelte a piacere da chissà chi?

Il modello standard non è in grado di fornire una spiegazione, perché tratta queste proprietà come un dato sperimentale *fornito alla teoria. Così* come l'andamento del mercato non può determinare quanti soldi avrete a fine giornata se non sapete a quanto ammonta l'investimento iniziale, il modello standard non può fare previsioni senza l'input dei 19 parametri fondamentali.

[6] Il modello standard prevede un meccanismo attraverso il quale le particelle acquistano massa: *il meccanismo di Higgs, cosí* chiamato in onore del fisico scozzese Peter Higgs. Ma se vogliamo giustificare le masse delle particelle, questo non fa che spostare il problema: dovremmo allora spiegare le proprietà di un'ipotetica «particella fornitrice di massa», il cosiddetto *bosone* di Higgs. Le ricerche sperimentali di questa particella sono in corso; ma anche se la trovassimo e misurassimo i suoi parametri, questi sarebbero dati di input per il modello standard, di cui la teoria non fornisce spiegazioni.

I fisici sperimentali, dunque, misurano i dati con la massima pignoleria e a partire da questi i teorici riescono a fare previsioni verificabili, tipo quale sia il comportamento della tal particella se viene fatta sbattere contro un'altra in un acceleratore. Ma il modello standard non sa dire nulla piú dei numeri che compaiono nelle tabelle 1.1 e 1.2, proprio come l'indice di borsa non sa spiegare perché avete investito proprio quella somma un anno fa.

Se gli esperimenti avessero rivelato tipi diversi di particelle, magari interagenti con forze diverse, questi cambiamenti avrebbero potuto essere facilmente immessi nel modello standard; in questo senso, il modello è troppo flessibile per poter spiegare le proprietà delle particelle elementari, perché è sostanzialmente indifferente alla scelta tra una vasta gamma di possibilità.

Nulla potrebbe essere piú diverso dalla teoria delle stringhe, che è un edificio unico e non flessibile. Non ha bisogno di nessun input esterno, tranne un unico numero (lo vedremo tra poco) che serve da scala di riferimento per le misure. Tutte le proprietà del mondo microscopico sono, in linea di principio, nel raggio del suo potere esplicativo. Per capirne di piú, pensiamo per un attimo a qualche «stringa» piú familiare, come le corde di un violino. Una corda può oscillare secondo un gran numero (un numero infinito, in verità) di modi di vibrazione che chiamiamo riso*nanze,* come quelli mostrati nella figura 6.1. Questi sono tipi d'onda con un numero finito di picchi e ventri equidistanti tra loro, che si incastrano perfettamente tra i due capi fissi della corda. L'orecchio percepisce questi diversi modi di vibrazione come diverse note. Le stringhe della nostra teoria hanno proprietà analoghe, cioè possono vibrare secondo quei modi che permettono a un numero intero di picchi e ventri di entrare nella loro estensione spaziale, come si vede nella figura 6.2. Ed ecco il fatto importante: come i diversi modi di vibrazione di una corda di violino danno origine alle varie note musicali, cosí *diversi modi di vibrazione di una stringa fondamentale danno origine a vane masse e varie cariche di gauge (cioè* quelle associate alle varie forze). Ripetiamo quanto appena detto, perché è il cardine di tutto: secondo la teoria delle stringhe, le proprietà di una particella elementare - la sua massa e le sue cariche di gauge - sono determinate dal modo di vibrazione della sua stringa interna.

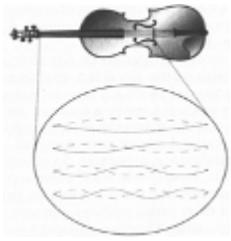

Figura 6. 1.
Le corde di un violino possono vibrare in modi risonanti, in cui c'è un numero intero di creste e ventri tra i due capi.

Figura 6.2.
Le stringhe chiuse possono vibrare in modi risonanti - come le corde del violino - in cui c'è un numero intero di creste e ventri nella loro estensione spaziale.

L'esempio delle masse *è* forse piú facile da seguire. L'energia di un particolare modo di vibrazione di una stringa dipende da ampiezza e lunghezza d'onda: maggiore è la prima e minore *è* la seconda, maggiore è l'energia. Questo è quanto ci aspetteremmo intuitivamente, perché una vibrazione frenetica deve avere piú energia di una placida (si vedano gli esempi della figura 6.3). Lo stesso accade con le corde del violino, che se vengono pizzicate con forza vibrano piú intensamente. Ora, grazie alla relatività ristretta sappiamo che massa ed energia sono due facce della stessa medaglia: a maggior energia corrisponde maggiore massa e viceversa. Quindi, secondo la teoria delle stringhe, la massa di una particella elementare è determinata dall'energia con cui vibra la sua stringa interna: particelle pesanti hanno stringhe che oscillano violentemente, particelle leggere hanno stringhe che oscillano dolcemente.

Poiché la massa di una particella determina le sue proprietà gravitazionali, vediamo che c'è una relazione diretta tra il modo di vibrazione di una stringa e la risposta della sua corrispondente particella al campo gravitazionale. Anche se la dimostrazione è un po' piú astratta, si può provare che una relazione analoga esiste tra altri aspetti del modo di vibrazione delle stringhe e le proprietà delle particelle rispetto alle altre forze: la carica elettrica, quella forte e quella debole sono determinate precisamente dal modo in cui la stringa oscilla. In piú, la stessa idea vale per le particelle mediatrici: i fotoni, i bosoni di gauge deboli e i gluoni non sono che altri modi di vibrazione di una stringa. E, cosa assai importante, un altro modo di vibrazione corrisponde perfettamente alle proprietà del gravitone, il che ci assicura che la gravità è parte integrante della teoria delle stringhe.[7] Per chi possiede gli strumenti matematici, notiamo qui che l'associazione tra modi

di vibrazione delle stringhe e cariche di gauge può essere descritta con piú precisione. Quando il moto di una stringa è quantizzato, i suoi modi di vibrazione possibili sono vettori in uno spazio di Hilbert, come accade per ogni sistema quantistico. Questi vettori possono essere etichettati con i loro autovalori rispetto a un insieme di operatori hermitiani commutanti. Tra questi operatori ci sono l'hamiltoniana, i cui autovalori forniscono l'energia e quindi la massa del modo di vibrazione, e altri operatori che generano varie simmetrie di gauge della teoria. Gli autovalori di questi ultimi forniscono le cariche di gauge associate ai corrispondenti stati di stringa.

Figura 6.3.
I modi di vibrazione piú frenetici hanno piú energia.

Questo quadro d'insieme ci mostra che le stringhe forniscono una straordinaria cornice di unificazione. Ogni possibile particella di materia e ogni mediatrice di forza è una stringa; il suo modo di vibrazione è l'«impronta digitale» che lascia nell'universo. Poiché ogni evento, processo o manifestazione del cosmo è descrivibile, a livello elementare, in termini di interazioni tra i suoi costituenti fondamentali, la teoria delle stringhe promette di essere un'unica, unitaria e onnicomprensiva descrizione dell'universo: una vera Teoria del Tutto (TOE).

4. La musica delle stringhe.

Anche se la nuova teoria si sbarazza del concetto di «particella elementare» priva di struttura, il vecchio linguaggio è duro a morire, specialmente quando ci fornisce una descrizione della realtà precisa fino alle piú microscopiche scale. Seguendo la pratica comune, continueremo a parlare di particelle elementari, ma ogni volta intenderemo con questo termine « ciò che sembra una particella elementare ma in realtà è una minuscola stringa in vibrazione ». Abbiamo appena visto che masse e cariche delle particelle sono il risultato delle vibrazioni delle stringhe. Quindi se riuscissimo a stabilire quali sono i modi di vibrazione permessi- quali « note » possono essere suonate dalle stringhe, - saremmo in grado di *spiegare* perché le particelle elementari hanno le loro proprietà sperimentalmente osservate.

A questo punto, dunque, dovremmo «prendere in mano» una stringa e «pizzicarla» in vari modi per determinare i suoi modi di vibrazione possibili. Se la teoria è corretta, la risposta dovrebbe ricondurci esattamente alle proprietà della materia e delle forze raccolte nelle tabelle 1.1 e 1.2. Ovviamente, una stringa è troppo piccola perché si possa eseguire direttamente questo «pizzicato». Grazie alla matematica, però, possiamo sentire *teoricamente* la musica delle stringhe. A metà degli anni ottanta, molti adepti della teoria pensavano che questo tipo di analisi stesse per rivelare tutte le proprietà dell'universo al livello piú microscopico e c'era chi sosteneva che la TOE era stata finalmente trovata. Il tempo ha mostrato che questa euforia era prematura. La teoria delle stringhe porta in sé tutti i segni di una TOE, ma ha sul suo cammino ancora molti ostacoli, il che ci impedisce di calcolare lo spettro dei modi di vibrazione con la precisione necessaria per un confronto sperimentale. A oggi, quindi, non sappiamo se i numeri delle tabelle 1.1 e 1.2 possano saltar fuori dalla teoria. Come vedremo nel capitolo IX, sotto certe ipotesi che enunceremo esplicitamente, la teoria delle stringhe può dare origine a un universo le cui proprietà concordano qualitativamente con ì dati in nostro possesso su masse e forze; ma una previsione quantitativa dettagliata è ancora al di là delle nostre forze. E quindi, anche se la teoria delle stringhe, al contrario del modello standard, è in grado di dare una spiegazione dei motivo per cui le particelle e le forze sono fatte a quel modo, non siamo stati ancora capaci di farlo. Ma la nuova teoria è cosí ricca di spunti e ha validità cosí generale che ci permette comunque di guardare con occhi nuovi un gran numero di fenomeni, come vedremo nel corso del libro.

Per quel che riguarda gli ostacoli alla teoria, nei prossimi capitoli ne vedremo qualcuno in dettaglio; è comunque istruttivo parlarne prima a livello generale. Le corde del mondo macroscopico possono presentare vari livelli di tensione: le stringhe delle scarpe, ad esempio, sono molto meno tese rispetto alle corde di un violino, e queste sono meno tese ancora delle corde metalliche di un pianoforte. L'unico numero di cui la teoria delle stringhe ha bisogno come pietra di paragone è proprio la tensione esercitata sulle stringhe chiuse. Come facciamo a calcolarla? Beh, se riuscissimo a pizzicare in qualche modo una stringa fondamentale potremmo sentire la resistenza che oppone e quindi calcolare la sua tensione proprio come facciamo per le corde macroscopiche. Ma come abbiamo già visto questa strada sperimentale non è percorribile, e

abbiamo dunque bisogno di un metodo indiretto. Quando nel 1974 Scherck e Schwarz avanzarono l'ipotesi che uno dei modi di vibrazione della stringa rappresentasse il gravitone, riuscirono anche a calcolare con una di queste tecniche indirette quale fosse la tensione fondamentale. Secondo i loro calcoli, l'intensità della forza mediata dalla particella che si origina dalla vibrazione (in questo caso il gravitone) è inversamente proporzionale alla tensione della stringa. E poiché il gravitone media la forza gravitazionale, che è notoriamente molto debole, la tensione che ne risulta è assolutamente colossale: mille miliardi di miliardi di miliardi di miliardi (1039) di tonnellate, la cosiddetta *tensione di Planck.* Le stringhe microscopiche sono dunque enormemente rigide rispetto agli esempi presi dal mondo quotidiano visti prima. Questo fatto ha tre importanti conseguenze.

5. Tre conseguenze della rigidità delle stringhe.

In primo luogo, mentre le corde di un violino o di un pianoforte sono fisse a due estremi, nulla riesce a «tener ferma» una stringa fondamentale. La straordinaria tensione implica che la stringa si contrae indisturbata fino ad assumere dimensioni minuscole, dimensioni che si possono calcolare. Il risultato è che una stringa è grande in media quanto la lunghezza di Planck (10-33 cm), come abbiamo già detto.

[8] Basandosi su alcune idee derivanti dalla seconda rivoluzione delle superstringhe (di cui parleremo nel capitolo XII), Witten e soprattutto Joe Lykken (del Fermilab) hanno trovato un modo possibile, seppure complicato, di aggirare questa conclusione. Secondo Lykken le stringhe potrebbero essere soggette a una tensione molto minore e quindi essere molto piú grandi di quanto si pensasse inizialmente - cosí grandi che potrebbero essere addirittura osservate dalla prossima generazione di acceleratori di particelle. Se questa proposta azzardata si rivelasse vera, ci sarebbe l'eccitante possibilità di poter verificare sperimentalmente, entro una decina d'anni, molte delle notevoli proprietà di cui parliamo qui. Ma anche sotto ipotesi piú « convenzionali », per cui la lunghezza delle stringhe è dell'ordine di 10-33 cm, esistono modi indiretti per poterle sottoporre a test, come vedremo nel capitolo IX.

Secondariamente, la tensione fa sì che l'energia di una stringa in vibrazione sia estremamente elevata. Per capire perché, basta pensare allo sforzo minore che si fa per pizzicare una corda di violino, rispetto a quello necessario per far vibrare una corda di pianoforte, che è molto piú tesa. Vista questa dipendenza, abbiamo che due stringhe con diverse tensioni che vibrano esattamente nello stesso modo avranno energie diverse: quella piú tesa ne avrà piú di quella meno tesa, perché c'è bisogno di maggior lavoro per metterla in oscillazione.

Questo ci mostra che l'energia di una stringa dipende da due fattori: il suo modo di vibrazione (oscillazioni piú frenetiche corrispondono a piú energia) e la sua tensione (proporzionale all'energia). In un primo momento potreste pensare che diminuendo sempre piú l'intensità della vibrazione, cioè l'ampiezza dell'onda e il numero di picchi e ventri, l'energia immagazzinata in una stringa possa tendere a zero. Ma come abbiamo visto nel capitolo IV, in un diverso contesto, questo ragionamento è vietato dalla meccanica quantistica. Come tutte le onde, anche queste sono soggette alla legge che le vuole costituite di unità discrete. Come gli inquilini dello stanzone portano con sé un numero intero di monete o banconote, cosí l'energia di una stringa vibrante è un multiplo intero di un « pacchetto minimo ». In particolare, l'unità minima di energia in questo caso è proporzionale alla tensione della stringa (e anche al numero di picchi e ventri del modo di vibrazione), mentre il multiplo intero è determinato dall'ampiezza.

Il punto fondamentale per la nostra discussione è questo: poiché le quantità minime di energia sono proporzionali alla tensione, e poiché quest'ultima è gigantesca, altrettanto enormi saranno le energie coinvolte, perlomeno rispetto alla scala consueta dei fenomeni microscopici. L'unità di base è *l'energia di Planck.* Per darvi un'idea delle sue dimensioni, se la convertiamo in massa usando la solita relazione $E = mc^2$, troviamo un risultato nell'ordine di dieci miliardi di miliardi (1019) di masse protoniche. Questa massa gigantesca - rispetto agli standard della fisica delle particelle elementari - è ovviamente nota come *massa di Planck,* ed è piú o meno uguale a quella di un granello di polvere o di un milione di batteri. Quindi, la massa equivalente tipica di una stringa in vibrazione è un multiplo intero (1, 2, 3 ...) della massa di Planck. I fisici dicono in questo caso che la scala di riferimento «naturale» o «tipica» dell'energia (e quindi della massa) nella teoria delle stringhe è la scala di Planck.

Tutto ciò solleva una questione fondamentale, strettamente collegata al nostro obiettivo di «generare» i numeri delle tabelle 1.1 e 1.2. Se l'energia tipica delle stringhe è dieci miliardi di miliardi di volte quella del protone, come possiamo sperare di arrivare alle particelle assai piú leggere, come elettroni, quark e fotoni, che costituiscono il mondo

fisico?

Ancora una volta la meccanica quantistica viene in soccorso. Il principio di indeterminazione ci assicura che nulla è mai perfettamente a riposo: ogni corpo è sottoposto a un'agitazione quantistica, perché se cosí non fosse saremmo in grado di conoscerne posizione e velocità con precisione assoluta, violando i dettami di Heisenberg. Questo è vero anche per i nostri anellini: anche se una stringa sembra in quiete assoluta, in realtà sta sperimentando un qualche tipo di agitazione quantistica. La cosa bizzarra, come già si era capito negli anni settanta, è che ci può essere un fenomeno di *cancellazione* tra questa agitazione e le piú intuitive oscillazioni esemplificate nelle figure 6.2 e 6.3. Ma le stranezze della meccanica quantistica non finiscono mai: i calcoli ci mostrano che l'energia associata all'agitazione quantistica di una stringa è *negativa,* e quindi il fenomeno *riduce* l'energia totale della stringa in vibrazione di un fattore quasi uguale all'energia di Planck. Quindi i modi di vibrazione ad energia minimale, che ci saremmo aspettati ingenuamente pari all'energia di Planck, sotto l'effetto della cancellazione presentano livelli energetici relativamente bassi - livelli le cui masse corrispondenti sono perfettamente comparabili, come ordine di grandezza, a quelle delle tabelle 1.1 e 1.2. Sono queste energie piú *basse,* dunque, che forniscono il punto di contatto tra la descrizione teorica delle stringhe e il mondo sperimentalmente sondabile delle particelle elementari. Per fare un esempio dei piú importanti, Scherk e Schwarz trovarono che nel modo di vibrazione candidato a generare il gravitone la cancellazione è *totale,* e dunque la particella risultante non ha massa. Questo è proprio quanto ci aspettiamo dal gravitone: la gravità si trasmette alla velocità della luce, e poiché solo le particelle prive di massa possono raggiungere questa velocità, la mediatrice deve essere appunto senza massa. C'è da dire, però, che i casi in cui l'energia è piccola sono piú l'eccezione che la regola: la tipica stringa in vibrazione corrisponde a una particella miliardi e miliardi di volte piú massiccia del protone.

Questo ci dice che le particelle piuttosto leggere che compaiono nelle tabelle 1.1 e 1.2 devono nascere, in un certo senso, a partire dalla spuma piú fine di un oceano di stringhe in tempesta. Anche una particella pesante come il quark top (189 masse protoniche) può sorgere da una stringa solo se l'enorme energia caratteristica di quest'ultima viene cancellata dall'agitazione quantistica per piú di una parte su cento milioni di miliardi. Immaginate di essere un concorrente di OK *il prezzo è giu*sto a cui viene fatta questa offerta: avete a disposizione dieci miliardi di miliardi e potete spenderli come volete in prodotti (di cui non conoscete il prezzo, secondo le regole del gioco) a patto che alla fine vi rimangano in tasca 189 lire, non una di piú e non una di meno. Capirete che è un'impresa impossibile anche per il piú esperto e incallito consumatore. Nella teoria delle stringhe, dove la moneta corrente è l'energia, accade la stessa cosa. Calcoli approssimati mostrano in modo convincente che la cancellazione può *accadere,* ma, per motivi che diverranno piú chiari nei prossimi capitoli, verificare che avvenga a simili livelli di precisione è al di là delle nostre attuali capacità teoriche. Comunque vedremo che esistono altre proprietà non cosí sensibili ai dettagli, che possono quindi essere manipolate e comprese senza problemi.

Questo ci porta alla terza conseguenza dell'enorme tensione delle stringhe. Le stringhe possono avere infiniti modi di vibrazione; nella figura 6.2 abbiamo mostrato solo l'inizio di una serie infinita caratterizzata da un numero crescente di picchi e ventri. Questo vuol forse dire che esisterà una corrispondente sequenza infinita di particelle elementari, contro ciò che ci sembrano dire le tabelle 1.1 e 1.2 ?

La risposta è sì: se la teoria delle stringhe è corretta, a ognuno degli infiniti modi di vibrazione corrisponde una particella elementare. Però, l'elevata tensione delle stringhe fa sì che quasi tutti questi modi corrispondano a particelle molto pesanti (molte volte piú della massa di Planck): sono infatti pochissimi quelli a energia bassa con un effetto di cancellazione quantistico quasi totale. Poiché i nostri acceleratori piú potenti non vanno oltre energie dell'ordine di 1000 masse protoniche, quindi meno di un milionesimo di miliardesimo dell'energia di Planck, siamo assai lontani dal poter cercare in laboratorio le nuove particelle previste dalla teoria delle stringhe.

Ci sono però vie indirette per scovare queste particelle pesanti. Ad esempio, l'energia coinvolta nella nascita dell'universo, nel big bang, è di sicuro abbastanza elevata da produrne in gran numero. Nessuna dovrebbe essere sopravvissuta fino ai giorni nostri, perché le particelle di grande massa decadono in fretta in una serie di particelle sempre piú leggere, fino ad arrivare a quelle piú familiari che troviamo oggi. Però in teoria è possibile che uno di questi modi di vibrazione superenergetici - un relitto del big bang - sia giunto fino a noi. Se riuscissimo a trovare questa particella (e vedremo meglio come nel capitolo IX) avremmo fatto davvero un passo da gigante.

6. Gravità e meccanica quantistica nella teoria delle stringhe.

Il potere di unificazione della teoria delle stringhe è notevole, Ma la sua vera attrattiva sta nella sua capacità di pacificare i contendenti del feroce conflitto tra gravità e quanti. Come ricorderete, tra relatività generale e meccanica quantistica i problemi sorgono quando un dogma della prima - lo spaziotempo ha una struttura geometrica regolare - si scontra con uno della seconda - tutto nell'universo è soggetto a fluttuazioni quantistiche, che aumentano d'intensità al decrescere della scala spaziale. Al di sotto della lunghezza di Planck, le fluttuazioni sono cosí violente che distruggono la regolarità della geometria spaziotemporale, mandando a rotoli la relatività generale.

La teoria delle stringhe mitiga le violente fluttuazioni quantistiche «sfocando » lo spazio a piccole scale. C'è un modo approssimato e uno preciso di spiegare come e perché ci riesca. Vediamoli entrambi.

7. Una spiegazione approssimata.

Anche se può sembrare troppo grezzo, un modo per conoscere la struttura di un oggetto consiste nel lanciargli contro altri oggetti e osservare come e quanto questi rimbalzano. Ad esempio noi vediamo la realtà esterna perché gli occhi raccolgono (e il cervello decodifica) le informazioni portate dai fotoni, che «rimbalzano» sugli oggetti. La ricerca con gli acceleratori di particelle si basa sullo stesso principio: si lanciano pezzetti di materia come elettroni e protoni l'uno contro l'altro o contro particolari bersagli, e poi si misurano con rivelatori particolari le macerie che rimangono dopo la collisione per risalire alla struttura dei corpi originari.

Come regola generale, la dimensione della particella di prova costituisce il limite minimo di dettaglio della nostra investigazione. E' un'affermazione importante, che è bene spiegare con un esempio. I nostri amici Slim e Jim vogliono farsi una cultura, cosí si iscrivono a un corso di arte e disegno. Lezione dopo lezione, Slim diventa sempre piú bravo e Jim sempre piú invidioso, fino a quando decide di sfidare il fratello in modo insolito. Ognuno deve prendere un nocciolo di pesca, assicurarlo in una morsa e farne un disegno il piú accurato possibile; la stranezza sta nel fatto che nessuno potrà osservare direttamente il nocciolo, ma solo dedurre qualcosa sulla sua forma lanciandogli contro delle palline (non fotoni!) e studiando il loro rimbalzo, come mostrato dalla figura 6.4. Subdolamente, Jim riempie il «cannone » di Slim con delle biglie (fig. 6.4a), e il suo con pallini di plastica molto piú piccoli, del diametro di 5 millimetri (fig. 6.4b). Si dà fuoco alle polveri e la gara ha inizio.

Slim non riesce a fare meglio di quanto mostrato nella figura 6.4a; le traiettorie delle biglie gli dicono che l'oggetto è piccolo e duro, ma nulla piú. Le biglie sono troppo grandi per essere influenzate (per «accorgersi») dai corrugamenti sulla superficie del nocciolo. Slim è assai sorpreso quando vede che Jim ha fatto meglio di lui (fig. 6.4b). Ma un'occhiata ai cannoni risolve il mistero: le sonde usate da Jim sono abbastanza piccole da essere deviate in modo significativo dalle irregolarità del nocciolo. Slim allora, che detesta perdere, sostituisce astutamente le sue biglie con sonde ancora piú piccole - pallini da mezzo millimetro e disegna il capolavoro vincente mostrato nella figura 6.4c.

La lezione di questa storiella è semplice: una sonda - cioè una particella di prova - per servire a qualcosa non può essere molto piú grande di ciò che si vuole esaminare, perché in questo caso non ne viene influenzata (deviata) a sufficienza.

Lo stesso ragionamento vale per il mondo atomico e subatomico. Se vogliamo conoscere la composizione microscopica del nocciolo, i pallini da mezzo millimetro non servono a nulla: ecco perché negli acceleratori di particelle le sonde usate sono protoni o elettroni. A scala subatomica, dove la meccanica quantistica rimpiazza la fisica classica, la misura dell'utilità di una particella di prova è data dalla sua lunghezza d'onda quantistica, che indica il livello di incertezza nella sua posizione. Questo ci ricorda quanto abbiamo detto nel capitolo IV a proposito del principio di indeterminazione di Heisenberg, dove abbiamo visto che il margine d'errore che si ha utilizzando una particella di prova puntiforme (lì ci siamo concentrati sui fotoni, ma il ragionamento si applica a tutte le particelle) è circa uguale alla lunghezza d'onda quantistica della particella stessa. In parole un po' meno precise, la sensibilità di una particella di prova è peggiorata dall'agitazione quantistica, proprio come la precisione del bisturi è compromessa se la mano del chirurgo trema. Ma nel capitolo IV abbiamo anche visto che la lunghezza d'onda di una particella è inversamente proporzionale alla sua quantità di moto, cioè in parole povere alla sua energia; quindi, aumentando quest'ultima, possiamo far decrescere la lunghezza

d'onda e attenuare le sbavature dovute agli effetti quantistici, e quindi possiamo usare la particella come sonda piú sensibile. Intuitivamente, particelle di maggiore energia hanno piú potere penetrante e quindi sono in grado di scandagliare strutture piú fini.

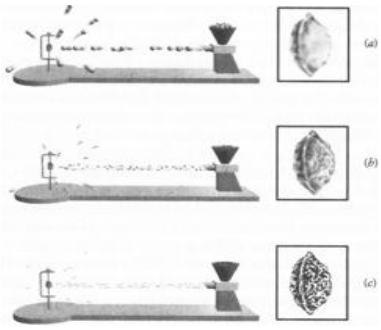

Figura 6.4.

Un nocciolo di pesca bloccato in una morsa viene disegnato solo sulla base del comportamento di alcune sonde che gli vengono sparate contro. Con sonde sempre piú piccole - biglie in (a), pallini da 5 mm in (b) e da 0,5 mm in (c) - si ottengono figure sempre piú dettagliate.

E qui che la differenza tra particelle puntiformi e stringhe diventa evidente. Come accadeva per i pallini e il nocciolo di pesca, l'estensione spaziale propria di una stringa fa si che questa non possa sondare la struttura di corpi piú piccoli di se stessa, cioè della lunghezza di Planck. Nel 1988 David Gross e il suo studente Paul Mende, a Princeton, dimostrarono che aumentare l'energia di una stringa *non* migliora la sua capacità di sonda, al contrario di quanto accade per le particelle puntiformi. Piú precisamente, tutto va bene fino al valore richiesto per sondare strutture grandi come la lunghezza di Planck; oltre questa soglia l'energia in piú aumenta il potere risolutivo della stringa, ma la fa diventare piú *grossa (il* che diminuisce le sue capacità di sonda). Se le fornissimo abbastanza energia - e stiamo parlando di valori al di là di ogni possibile immaginazione, valori simili a quelli liberati nel big bang - una stringa diventerebbe un *oggetto macroscopico:* una sonda del tutto inutile per il microcosmo! E' come se una stringa, contrariamente a una particella, avesse due fonti di indeterminazione: l'agitazione quantistica e la sua estensione spaziale. Aumentare l'energia riduce la prima, ma fa intervenire pesantemente la seconda. In sintesi, non c'è modo di usare le stringhe per sondare i fenomeni che avvengono a scale inferiori alla lunghezza di Planck.

Ma il conflitto tra relatività generale e meccanica quantistica nasce proprio a causa di ciò che avviene a queste scale! *Se i costituenti elementari dell'universo non possono sondare ciò che avviene in dimensioni minori della lunghezza di Planck, allora non possono essere toccati dalle fluttuazioni quantistiche* piú *violente.* Provate a passare la mano su una lastra di granito molto levigata: anche se a livello microscopico la superficie si mostra granulosa e piena di irregolarità, le dita umane non se ne accorgono e il tutto ci sembra perfettamente liscio. Similmente, le stringhe, che sono estese nello spazio, non sono sensibili a caratteristiche per loro «microscopiche», cioè non riescono a sentire nulla al di sotto della lunghezza di Planck. Come un dito non avverte la struttura cristallina del granito, cosí la stringa ignora le fluttuazioni ultramicroscopiche del campo gravitazionale. Anche se tali fluttuazioni sono comunque essenziali, questa proprietà delle stringhe le rende abbastanza «lisce» da permettere di superare il dissidio tra meccanica quantistica e relatività generale. In particolare, i nefasti «infiniti » che saltavano fuori in ogni tentativo di teoria quantistica della gravità fondata sulla nozione di particella puntiforme sono invece assenti dalla teoria delle stringhe.

C'è una differenza essenziale tra il nostro dito e una stringa. Nel primo caso è *possibile* superare l'imprecisione e scoprire la struttura microscopica del granito, perché è possibile usare sonde piú piccole e piú precise (un microscopio elettronico, ad esempio, ha un potere di risoluzione inferiore al milionesimo di centimetro). Ma nella teoria delle stringhe non c'è modo di rivelare le «imperfezioni» della realtà piú piccole della lunghezza di Planck: la nozione radicata secondo la quale non c'è limite alla finezza con cui possiamo dissezionare la natura si rivela falsa. C'è un limite preciso, che entra in gioco subito prima di incontrare i disastri provocati dalla schiuma quantistica (vedi fig. 5.1). Quindi, in un certo senso (su cui saremo piú precisi in seguito) possiamo affermare che la prevista agitazione estrema alle scale inferiori alla lunghezza di Planck *non esiste.* Dopo tutto, per un positivista qualcosa esiste solo se - perlomeno in linea di principio - può essere rilevato e misurato. Se supponiamo che la stringa sia il costituente piú elementare dell'universo e che essa sia troppo grossa per accorgersi di un certo fatto, questo fatto non può essere misurato e dunque non esiste. Concludendo, secondo la teoria delle stringhe le violente irregolarità della trama spaziale alle scale inferiori alla lunghezza di Planck non esistono.

8. Un colpo di mano?

A questo punto, qualcuno potrebbe sentirsi quasi gabbato. Invece di mostrare che la teoria delle stringhe doma le asperità delle fluttuazioni quantistiche a scale minori di quella di Planck, abbiamo usato la faccenda dell'estensione spaziale delle stringhe per aggirare del tutto il problema. Ma abbiamo davvero risolto la questione? Sì, per due buone ragioni.

In primo luogo, ciò che abbiamo visto nel paragrafo precedente implica che le fluttuazioni quantistiche al di sotto della scala di Planck sono un'invenzione della relatività generale e della meccanica quantistica, quando sono formulate pensando a particelle puntiformi. In un certo senso, quindi, il conflitto centrale della fisica contemporanea ce lo siamo costruito con le nostre proprie mani.

Avendo sempre pensato alle particelle come idealmente prive di dimensioni, siamo stati costretti a indagare le proprietà dell'universo in regioni di spazio arbitrariamente piccole, fino ad incontrare, scendendo sempre piú, problemi apparentemente insormontabili. La teoria delle stringhe ci mostra che i problemi nascevano dal non aver capito come stavano davvero le cose, e cioè che esiste un limite alle nostre possibilità di sondare l'universo - addirittura un limite oltre il quale non ha senso applicare la nostra nozione comune di distanza. Le rovinose fluttuazioni quantistiche nascevano perché non lo sapevamo ed eravamo condotti dalle nostre teorie puntiformi a superare di molto i limiti della realtà fisica.

Questa soluzione sembra davvero semplice. Vi potreste chiedere perché ci è voluto cosí tanto tempo prima che a qualcuno venisse l'idea di abbandonare le particelle puntiformi. La risposta ci conduce al secondo punto di questa discussione. Già molti anni fa, le piú grandi menti della fisica teorica, come Pauli, Heisenberg, Dirac e Feynman, ci avevano pensato, ipotizzando che i costituenti ultimi della natura non fossero « punti », ma « sferette », « masserelle », oggetti dotati di estensione spaziale. Ma presto si scoprì che costruire su queste basi una teoria consistente con i principi fisici fondamentali, come la conservazione della probabilità quantomeccanica (il che impedisce agli oggetti fisici di sparire dall'universo senza lasciare traccia) o l'impossibilità di trasmettere informazioni a velocità superiori a quella della luce, era impossibile. In qualche modo, tutti i tentativi di questi grandi scienziati finivano per violare uno o entrambi questi principi. Per molto tempo, dunque, si pensò che l'unica teoria quantistica sensata dovesse essere basata sulle particelle puntiformi. Ciò che impressiona della teoria delle stringhe è che, nonostante alcuni suoi aspetti siano stravaganti, rispetta comunque tutti i requisiti fondamentali per essere una teoria fisica sensata e coerente. E inoltre, grazie al modo di vibrazione del gravitone, la teoria delle stringhe è una teoria quantistica che comprende la gravità.

9. Una spiegazione piú precisa.

Aver capito la prima spiegazione è sufficiente per avere un'idea del perché la teoria delle stringhe è vincente; quindi, se volete saltare questo paragrafo, potete farlo senza perdere il filo logico del discorso. Ma poiché nel capitolo II abbiamo appreso i fondamenti della relatività ristretta, possediamo gli strumenti necessari per affrontare un ragionamento un po' piú preciso.

Anche in questo caso ci basiamo sulla stessa idea vista prima, ma esprimiamo il tutto direttamente a livello di stringhe; confrontiamo cioè le sonde puntiformi con quelle date dalle stringhe. Vedremo come l'estensione spaziale di queste ultime faccia sparire un tipo di informazione ottenibile con la teoria puntiforme, e quindi come ci permette di aggirare allegramente i problemi delle scale piú microscopiche che sono alla base dei dilemmi della fisica contemporanea.

Vediamo prima come interagiscono tra loro due particelle puntiformi - ammesso che esistano, naturalmente - e quindi come possono essere utilizzate come sonde. Il caso piú semplice è quello di due particelle in rotta di collisione, cioè i cui cammini si intersecano, come nella figura 6.5. Se si trattasse di palle da biliardo, ci sarebbe uno scontro, e le due palle proseguirebbero su traiettorie deviate. La teoria quantistica puntiforme mostra che a livello microscopico succede piú o meno la stessa cosa, anche se i dettagli sono un po' diversi.

Per amor di concretezza e di semplicità, immaginiamo che le due particelle siano un elettrone e un positrone, la sua

antiparticella. Quando materia e antimateria collidono, si annichilano in un lampo di pura energia e producono, ad esempio, un fotone.

[9] Il lettore esperto avrà capito che il fotone prodotto nella collisione tra un elettrone e un positrone è un fotone virtuale, e quindi deve restituire subito l'energia diventando una coppia particella-antiparticella.

Per distinguere il percorso del fotone da quello dell'elettrone e del positrone, seguiamo una convenzione tradizionale e lo disegniamo con una linea ondulata, come nella figura 6.6. Il fotone camminerà per un po' e poi rilascerà l'energia accumulata generando un'altra coppia elettrone -positrone. Alla fine, le traiettorie delle due particelle, che interagiscono grazie alla forza elettromagnetica, deviano in modo molto simile a quanto accade per due palle da biliardo.

Vediamo di capire «dove» esattamente avviene l'interazione, cioè qual è il punto preciso in cui l'elettrone e il positrone si annichilano. Il fatto fondamentale, come capiremo tra poco, è che la teoria puntiforme prevede come risposta un punto dello spazio e un momento del tempo assolutamente preciso ed inequivocabile: è quello segnato nella figura 6.6.

Come cambia tutto ciò se, ad un esame piú attento, gli oggetti che ci sembravano puntiformi si rivelano essere stringhe unidimensionali?

Figura 6.5.

Due particelle interagiscono - si « scontrano » - e i loro cammini vengono deviati.

Figura 6.6.

Nella teoria quantistica dei campi, una particella e la sua antiparticella possono annichilarsi momentaneamente, producendo un fotone. Subito dopo, il fotone dà origine a un'altra particella e un'altra antiparticella che viaggiano su diverse traiettorie.

Il processo di interazione è in fondo lo stesso, ma ora gli oggetti in rotta di collisione sono piccoli anelli oscillanti, come mostrato nella figura 6.7. Se i modi di vibrazione sono quelli giusti, a queste due stringhe corrisponderanno un elettrone e un positrone, proprio come nella figura 6.6. Come nel caso precedente, le due stringhe si scontrano e si annichilano in un lampo di energia. Il lampo è in realtà un fotone, che a sua volta è una stringa con un altro, specifico modo di vibrazione; in sintesi, le due stringhe in collisione si fondono e diventano una terza stringa, come nella figura 6.7. Questa nuova stringa, proprio come accadeva prima, cammina un po' e poi rilascia l'energia dell'annichilazione dissociandosi in due altre stringhe che continuano il cammino. Ovviamente, da un punto di vista meno microscopico, tutto il processo apparirà assolutamente identico a quello della figura 6.6.

Ma in realtà c'è una differenza fondamentale. Abbiamo sottolineato come nel caso puntiforme la collisione avviene in un punto preciso dello spaziotempo, uguale per tutti gli osservatori. Come vedremo adesso, ciò è falso nelle interazioni tra stringhe. Torniamo a George e Mildred, la coppia in moto relativo del capitolo II, e vediamo come descriverebbero l'accaduto dai loro rispettivi punti di vista. Ci accorgeremo che sono in disaccordo sul dove e sul quando le due stringhe si sono toccate per la prima volta.

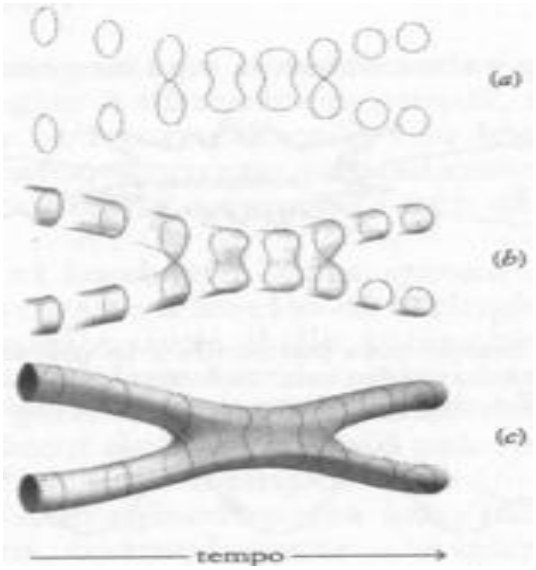

Figura 6.7.

(a) Due stringhe in rotta di collisione possono unirsi a formare una terza stringa, che si può a sua volta scindere in due stringhe che viaggiano su diverse traiettorie.

(b) Lo stesso processo visto in (a), disegnato evidenziando il moto.

(c) In una fotografia fatta tenendo l'obiettivo aperto per piú tempo, le due stringhe generano un « foglio di universo ».

Immaginiamo di registrare l'interazione con un macchina fotografica il cui obiettivo rimane aperto per tutta la durata dell'evento, cosí che questo è interamente catturato su un solo fotogramma.[10] Ovviamente, una macchina fotografica funziona come un collettore di fotoni che rimbalzano sull'oggetto che ci interessa, registrandoli sulla pellicola. Qui il nostro uso è del tutto simbolico, perché non vogliamo far altro che registrare nella figura 6-7c la storia completa dell'interazione. Detto questo, c'è un altro punto su cui la nostra trattazione sorvola. Abbiamo visto nel capitolo IV la formulazione di Feynman della meccanica quantistica, in cui si analizza il moto dei corpi sommando i contributi di tutti i possibili cammini tra il punto di partenza e quello di arrivo (i contributi sono dati da pesi statistici calcolati da Feynman). Nelle figure 6.6 e 6.7 mostriamo una delle infinite traiettorie possibili di una particella (fig. 6.6) o di una stringa (fig. 6.7). La trattazione fatta in questo paragrafo si applica altrettanto bene a ogni altra possibile traiettoria, e quindi a tutto il processo quantomeccanico. (La formulazione di Feynman è stata generalizzata alla teoria delle stringhe da Stanley Mandelstam di Berkeley e dal fisico russo Alexander Polyakov, attualmente a Princeton).

L'immagine che ne risulta è quello che si definisce il foglio di *universo* generato dalle stringhe, come mostrato nella figura 6.7c. «Affettando» il foglio di universo in sezioni parallele - proprio come si affetta un filone di pane - possiamo recuperare la dinamica dell'evento momento per momento. Ne mostriamo un esempio nella figura 6.8; nella 6.8a vediamo George che osserva attentamente le due stringhe in arrivo, e il piano corrispondente al suo punto di vista che taglia tutti gli eventi dello spazio che avvengono in quello stesso momento. (Come abbiamo già fatto piú volte, abbiamo eliminato una dimensione per rendere le cose piú chiare - in realtà, ovviamente, l'insieme degli eventi simultanei è tridimensionale).

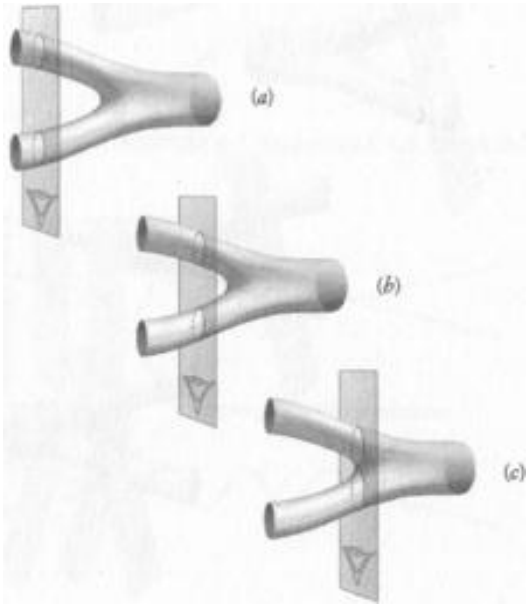

Figura 6.8.

Le due stringhe viste dalla prospettiva di George in tre momenti consecutivi. In (a) e (b) le stringhe si stanno riunendo, in (c) si toccano per la prima volta, da questo punto di vista.

Le figure *6.8b* e *6.8c* mostrano altre istantanee in momenti diversi - altre sezioni del foglio di universo - sempre dal punto di vista di George. La *6.8c* in particolare indica l'istante in cui, secondo lui, la due stringhe si toccano per la prima volta per poi fondersi nella terza stringa.

Facciamo la stessa cosa per Mildred. Come abbiamo visto nel capitolo II, il loro moto relativo fa sì che i due non siano d'accordo su quali eventi accadano allo stesso tempo: dal punto di vista di Mildred gli eventi simultanei sono quelli sul piano mostrato nella figura *6.9.* In altre parole, per lei il foglio di universo della *6-7c* deve essere sezionato in modo diverso per mostrare l'esatta progressione dei momenti, come è raffigurato nelle *6.9b* e *6.9c.* L'ultima figura, in particolare, mostra il momento del primo contatto tra le stringhe secondo il suo punto di vista.

Nella figura *6.10* mettiamo a confronto la *6.8c* con la *6.9c: è* chiaro che George e Mildred non concordano su dove e quando avviene il primo contatto tra le due stringhe. Essendo queste oggetti dotati di estensione spaziale, fanno sì che *non esiste un punto univoco nello spaziotempo in cui avviene l'interazione.* Tale punto dipende infatti dallo stato di moto dell'osservatore.

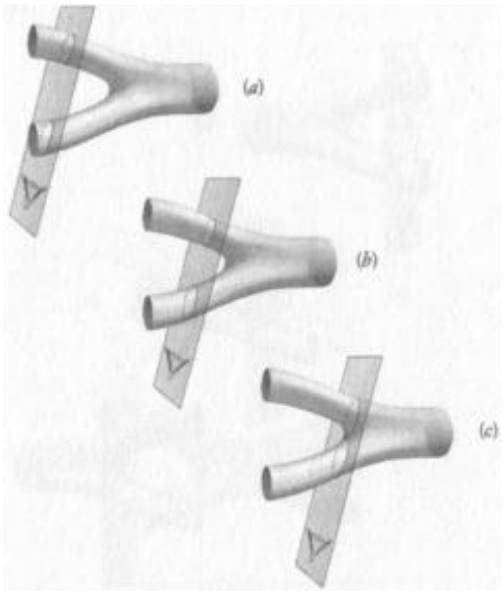

Figura 6. 9. Come la figura 6.8, ma dal punto di vista di Mildred.

Applicando lo stesso ragionamento a due particelle puntiformi, come nella figura 6. 11, ritorniamo al risultato visto prima: il punto in cui avviene il primo contatto esiste ed *è* unico. Se la forza coinvolta nell'interazione *è* quella gravitazionale, *cioè* se la particella mediatrice *è il* gravitone e non il fotone, questo « impaccamento » dell'evento in un unico punto porta a conseguenze disastrose, come ai risultati infiniti di certi calcoli menzionati sopra. Invece le stringhe «espandono » il luogo dell'interazione, perché diversi osservatori la percepiscono avvenire in luoghi diversi. Questo fa sì che la forza coinvolta si distribuisca in una regione spaziale, e nel caso della gravità una tale «diluizione» porta a cambiamenti significativi nelle proprietà ultramicroscopiche dell'evento, tanto che i calcoli sì comportano bene e danno risultati finiti laddove nel caso puntiforme erano infiniti. Questa *è* la versione piú precisa di ciò che si è detto due paragrafi piú sopra; anche in questo caso, la conseguenza primaria *è* che l'agitazione quantistica viene domata, perché tutto ciò che è piú piccolo della lunghezza di Planck viene in un certo senso fuso insieme.

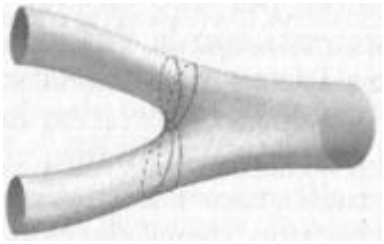

Figura 6. 10.
George e Mildred non concordano su dove sia avvenuta l'interazione.

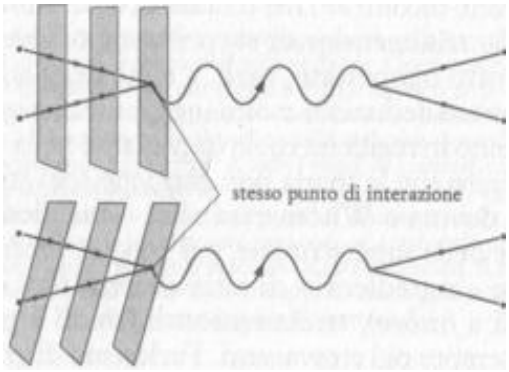

Figura 6. 11.
Osservatori in moto relativo sono d'accordo sul momento e sul luogo dell'interazione di due particelle puntiformi.

La teoria delle stringhe si comporta come un paio di occhiali non adatti: ci rende « sfocati » (e inoffensivi) tutti i dettagli alla scala di Planck e oltre, che la teoria puntiforme rende invece accessibili. Ma mentre gli occhiali possono essere cambiati, se la teoria delle stringhe è corretta non esistono lenti in grado di mettere a fuoco le fluttuazioni di quel regno microscopico. L'incompatibilità della meccanica quantistica e della relatività generale -che compare appunto a scale inferiori a quella di Planck - cessa in un universo dove c'è un limite inferiore alle dimensioni accessibili, o meglio c'è un limite inferiore a ciò che si può dimostrare esistere. L'universo della teoria delle stringhe è proprio fatto cosí: le leggi dei grandi e dei piccoli domini si possono fondere armoniosamente, e della prevista catastrofe che accade a distanze ultramicroscopiche ci si può sbarazzare sommariamente.

10. Oltre le stringhe?

Le stringhe sono speciali per due motivi. Primo, pur essendo estese spazialmente sono consistenti con la descrizione della meccanica quantistica. Secondo, uno tra i loro modi di vibrazione possibili ha esattamente le proprietà del gravitone, pertanto la gravità è parte intrinseca della loro struttura. Ma cosí come abbiamo visto che la nozione convenzionale di « particella puntiforme » a zero dimensioni non è che una idealizzazione matematica che non trova riscontro nella realtà, non potrebbe essere la stessa cosa per le stringhe unidimensionali? Forse le stringhe hanno un qualche «spessore », hanno due dimensioni come la superficie di una camera d'aria di bicicletta, o piú realisticamente ne hanno tre, come una minuscola ciambella. Gli ostacoli che già Heisenberg, Dirac e gli altri avevano incontrato nel tentare di costruire una teoria quantistica di particelle tridimensionali si sono sempre rivelati formidabili.

In modo del tutto inaspettato, però, a metà degli anni novanta, ci si è resi conto attraverso deduzioni molto ingegnose che questi oggetti pluridimensionali hanno in realtà un ruolo importante nella teoria delle stringhe. Anzi: si è capito che la teoria non contiene solo stringhe! Una delle osservazioni - dovuta a Witten e ad altri - che diede l'avvio alla seconda rivoluzione delle superstringhe, nel 1995, è proprio il fatto che la teoria deve avere «ingredienti» di altre dimensioni: costituenti bidimensionali (simili a *frisbee),* tridimensionali (simili a grumi) e cosí via, verso possibilità sempre piú stravaganti. Parleremo di queste ricerche piú recenti nei capitoli XII e XIII; per ora seguiamo il corso degli eventi e continuiamo ad esplorare le meravigliose proprietà di questo nuovo universo.

Capitolo settimo
Il «super» delle superstringhe

Quando si seppe che la spedizione di Eddington del 1919 aveva confermato le previsioni della relatività generale rispetto alla deviazione della luce solare, il fisico olandese Hendrik Lorentz spedì un telegramma ad Einstein per informarlo della buona notizia. La voce si sparse, e un giorno uno studente chiese al grande fisico che cosa avrebbe pensato se Eddington non avesse trovato la deviazione prevista. Einstein replicò: «In quel caso mi sarebbe davvero dispiaciuto per il buon vecchio Signore, perché la mia teoria è giusta»1 Albert Einstein, citato in R. Clark, *Einstein: The Life and Times,* Avon, New York *1984, p. 287* [trad. it. *Einstein: la vita pubblica e privata del piú grande scienziato del nostro tempo,* Rizzoli, Milano *1976].*

Nella fisica come nell'arte, la simmetria gioca un ruolo importante nei giudizi estetici. Ma in fisica la parola « simmetria » ha un significato molto concreto e preciso. Usando questo criterio diligentemente, fino ad arrivare a precise formulazioni matematiche, i ricercatori sono stati in grado di formalizzare teorie in cui le particelle materiali e quelle mediatrici delle forze sono legate in modo indissolubile tra loro, piú di quanto si credesse possibile in passato. Queste teorie uniscono forze e materia, e hanno dunque il grado piú alto di simmetria: ecco perché sono state chiamate *supersimmetriche.* La teoria delle superstringhe, come vedremo, ne è la progenitrice, nonché la rappresentante piú importante.

1. La natura delle leggi fisiche.

Immaginate di abitare un universo in cui le leggi fisiche sono effimere come quelle della moda: cambiano di anno in anno, di settimana in settimana o addirittura da istante a istante. In un mondo simile, ammesso che i cambiamenti continuino a rendere possibili i processi vitali, non vi annoiereste di certo. La piú semplice azione sarebbe un'avventura, perché le variazioni casuali renderebbero impossibile usare il passato come guida per prevedere il futuro.

Un universo fatto in questo modo sarebbe l'incubo di ogni fisico. I fisici - e credo la maggioranza degli uomini - hanno un bisogno disperato di stabilità: le leggi che valgono oggi devono essere quelle che valevano ieri e che varranno domani (anche se non siamo ancora stati capaci di scoprirle tutte). Dopo tutto, che significato può avere una «legge» che cambia in continuazione? Questo non significa che l'universo debba essere statico - e l'universo effettivamente si trasforma in innumerevoli modi da istante a istante - ma che lo siano le norme che governano il cambiamento. Vi potreste chiedere se siamo davvero certi che ciò accada. In effetti non possiamo dirlo con sicurezza. Ma considerando che abbiamo avuto un certo successo nello spiegare molte caratteristiche dell'universo dai primi momenti dopo il big bang a oggi, ammesso e non concesso che le leggi cambino, lo stanno facendo molto lentamente. L'ipotesi piú sensata che si accorda con le nostre conoscenze è che le leggi della fisica siano fisse.

Ora immaginiamo un universo in cui le leggi fisiche sono «provinciali», e cambiano in modo imprevedibile a seconda delle culture locali. Viaggiare in un mondo simile riserverebbe sorprese continue, come quelle incontrate da Gulliver nei suoi viaggi. Un fisico si divertirebbe molto meno: anche questa prospettiva sarebbe terribile. E già abbastanza difficile convivere con il fatto che ciò che è proibito dalle leggi di uno Stato non lo è da quelle di un altro e viceversa; pensate cosa vorrebbe dire vivere in un universo dove lo stesso accade alle leggi di natura! Gli esperimenti fatti in un certo luogo non avrebbero alcun valore di prova per la fisica in vigore altrove, e le stesse esperienze dovrebbero essere ripetute in ogni dove per verificare le leggi locali. Fortunatamente, tutto ciò che sappiamo ci fa dire con una certa sicurezza che la

fisica è la stessa ovunque sulla Terra. E la nostra capacità di spiegare un gran numero di osservazioni astrofisiche, fatte nelle regioni piú remote del cosmo, grazie a un unico insieme di leggi ci porta a credere che lo stesso valga in tutto l'universo. Certo, ci sono molte zone all'altro capo dell'universo che non abbiamo ancora esplorato, e non possiamo escludere categoricamente che in qualche punto dello spazio valgano diverse leggi fisiche; ma tutto lascia supporre che non sia cosí.

Anche in questo caso, l'uniformità delle leggi non implica che l'universo sia identico, o abbia le stesse caratteristiche, in ogni luogo. Gli astronauti sulla Luna possono fare salti impensabili sulla Terra, ma la differenza nasce da una proprietà locale - cioè dal fatto che il nostro satellite ha una massa minore - e non dal cambiamento delle leggi di gravità di luogo in luogo. Le leggi di Newton, o piú precisamente di Einstein, sono le stesse sulla Terra e sulla Luna. L'astronauta sta solo sperimentando un dettaglio ambientale, non una variazione di una legge fisica.

In fisica si usa dire che queste due proprietà delle leggi - il fatto che non cambino nel tempo e nello spazio - riflettono una *simmetria* della natura. Con questo i fisici intendono dire che la natura tratta ogni momento del tempo e ogni luogo dello spazio esattamente allo stesso modo, assicurandoci che siano all'opera sempre le stesse leggi. Proprio come accade nell'arte, le simmetrie in fisica danno un senso di appagamento, perché mostrano ordine e coerenza. Constatare che un insieme ricco, complesso e diversificato di fenomeni è spiegabile a partire da un piccolo insieme di leggi universali fa utilizzare ai fisici le parole « eleganza » e «bellezza».

Abbiamo già incontrato esempi di simmetrie parlando di relatività ristretta e generale. Vi ricorderete che per il principio di relatività tutte le leggi devono valere identicamente per tutti gli osservatori che si muovano l'uno rispetto all'altro con velocità costante. Questo è un caso evidente di simmetria: ogni punto di vista è equivalente e ogni osservatore può ritenersi a ragione in quiete rispetto agli altri. Con questo non vogliamo affermare che tutti faranno le stesse esperienze: anzi, come abbiamo visto le osservazioni possono portare a notevoli differenze. Ma come nel caso dei salti sulla Luna, anche queste difformità sono dovute a variazioni locali - in questo caso nella velocità relativa degli osservatori - governate comunque dalle stesse leggi.

Questo tipo di simmetria, grazie al principio di equivalenza della relatività generale, può essere esteso a tutti gli osservatori, per quanto complesso e variato sia il loro moto. Come ricorderete, Einstein si rese conto che un osservatore in moto accelerato può affermare senza errore di essere a riposo, e di essere soggetto solo a un campo gravitazionale: includendo gli effetti della gravità, ogni punto di vista è perfettamente equivalente a tutti gli altri. Come abbiamo visto, questo trattamento egualitario degli osservatori, oltre ad essere esteticamente soddisfacente, ha avuto un ruolo cardinale perché Einstein giungesse alle sue sorprendenti conclusioni.

Esistono altri tipi di simmetria relativi a spazio, tempo e moto che le leggi di natura dovrebbero rispettare? Forse potrebbe essercene uno: le leggi dovrebbero ignorare *l'angolazione* sotto cui osserviamo un fenomeno. Ad esempio, se eseguiamo un esperimento e poi lo ripetiamo dopo aver ruotato tutte le apparecchiature di un certo angolo, nulla dovrebbe cambiare. Questo tipo di simmetria è detta di *rotazione,* e ci assicura che le leggi fisiche sono indifferenti *all'orientamento. E'* un tipo di simmetria che può stare sullo stesso piano di quelle viste prima.

Ce ne sono altre? Forse vi ricorderete delle simmetrie di gauge che abbiamo incontrato nel capitolo V, associate alle tre forze non gravitazionali. Si tratta certamente di simmetrie legittime, ma di un tipo piú astratto; qui ci concentriamo su quelle che hanno un legame diretto con spazio, tempo e moto. Con questa limitazione, *è* difficile pensarne altre. In effetti, nel *1967* Sidney Coleman e Jeffrey Mandula hanno dimostrato che nessun'altra simmetria aggiuntiva di questo tipo può combinarsi con quelle già viste e dar vita a un quadro teorico compatibile con le caratteristiche del mondo che ci circonda.

Alcune ricerche successive, però, hanno mostrato che c'era un modo possibile per sfuggire alle limitazioni imposte dal teorema di Coleman e Mandula. E' una scappatoia che si basa sul concetto di spin.

2. Lo spin

Una particella elementare come un elettrone può orbitare attorno al nucleo piú o meno come fa la Terra attorno al

Sole. Ma l'analogia pare fermarsi qui: nella tradizionale descrizione puntiforme dell'elettrone non è previsto un moto che ricordi la rotazione della Terra attorno al suo asse. In un oggetto in rotazione, infatti, i punti situati sul suo asse rimangono fermi; e un corpo puntiforme non possiede, in senso stretto, «punti sull'asse» che possano rimanere fermi. Quindi sembra che non abbia senso parlare di rotazione per una particella puntiforme. Ma anche in questo caso, la meccanica quantistica ci ha riservato una delle sue sorprese.

Nel 1925 i due fisici olandesi George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit scoprirono che c'era un modo per interpretare tutta una serie di dati misteriosi riguardanti la luce emessa ed assorbita dagli atomi: bastava supporre che gli elettroni avessero certe particolari proprietà magnetiche. Circa un secolo prima, Ampère aveva mostrato che il magnetismo è generato da cariche elettriche in moto; i due olandesi seguirono questa idea guida, scoprendo che le proprietà magnetiche indicate dai dati sperimentali potevano essere spiegate da un solo moto dell'elettrone: una rotazione su se stesso, cioè uno *spin.* Contrariamente a quanto previsto dalla teoria classica, gli elettroni hanno sia un moto di rivoluzione, sia un moto di rotazione.

Parlando di spin, Uhlenbeck e Goudsmit intendevano una rotazione vera e propria? Sì e no. Per essere piú precisi, il loro lavoro dimostrava l'esistenza di una nozione di spin abbastanza simile alla rotazione classica, ma dalle caratteristiche peculiarmente quantomeccaniche. E' una di quelle proprietà del mondo microscopico che fa a pugni con le idee classiche, ma che dà un « sapore quantico » ai dati sperimentali verificati. Immaginate ad esempio un pattinatore che gira su se stesso: se raccoglie le braccia a sé gira piú veloce, se le allarga rallenta. Prima o poi, a seconda della velocità iniziale, il moto cesserà del tutto. Questo non è ciò che accade nel mondo microscopico: ogni elettrone nell'universo, oggi e per sempre, ruota a velocità fissa e immutabile. Lo spin dell'elettrone non è uno stato di moto transitorio, come accade per oggetti piú familiari che, per un motivo o per l'altro, si mettono a girare: è invece una caratteristica intrinseca di questa particella, proprio come la massa o la carica elettrica. Se non avesse spin, un elettrone non sarebbe un elettrone.

Anche se i primi studi riguardavano soprattutto l'elettrone, ci si è accorti in seguito che l'idea di spin è applicabile a tutte le altre particelle della tabella 1.1. Questo è un fatto provato sperimentalmente con grande accuratezza: tutte le particelle materiali (con le loro corrispondenti di antimateria) hanno spin pari a quello dell'elettrone. Nel gergo fisico, questo fatto si riassume scrivendo che le particelle hanno « spin 1/2 », dove il valore 1/2 dà - piú o meno - una misura di quanto veloce (in senso quantomeccanico) la particella sta ruotando[2] Piú precisamente, spin *1/2* significa che il *momento angolare* dell'elettrone dovuto alla rotazione è pari a *~~h~~/2.*

Inoltre, si è scoperto che le particelle mediatrici delle forze non gravitazionali - fotoni, bosoni di gauge deboli e gluoni - hanno anche loro uno spin caratteristico che risulta essere pari a 1, il doppio delle particelle materiali.

Che dire della gravità? Anche prima dell'arrivo della teoria delle stringhe, si è stabilito che il gravitone (ipotetico) dovrebbe avere uno spin ancora piú elevato, pari a 2 (il doppio rispetto alla categoria precedente).

Nel contesto della teoria delle stringhe, lo spin, cosí come la massa e la carica, è associato a un particolare modo di vibrazione della stringa. Anche qui, come nel caso della teoria puntiforme, è impreciso pensare allo spin come generato da una vera e propria rotazione delle stringhe nello spazio, ma è un'immagine che aiuta a capire come stanno le cose. Per inciso, ora possiamo specificare cosa accadde nel 1974, quando Sherck e Schwarz annunciarono che la teoria delle stringhe era in grado di incorporare anche la gravità. Essi si accorsero che le stringhe, necessariamente, hanno un modo di vibrazione che dà origine a una particella priva di massa e con *Spin* 2: il marchio di fabbrica del gravitone.

Fatte queste premesse sullo spin, vediamo quale ruolo giochi nel campo delle simmetrie, e quale scappatoia riveli al teorema di Coleman e Mandula di cui abbiamo parlato poco sopra.

3. La supersimmetria e i partner supersimmetrici.

Come abbiamo sottolineato, il concetto di spin è superficialmente simile a quello classico di rotazione, ma se ne distacca radicalmente in un senso dato dalla meccanica quantistica. La sua scoperta nel 1925 ha rivelato che esiste un tipo di moto che non sarebbe possibile in un universo puramente classico.

Chiediamoci ora questo: cosí come il comune moto di rotazione ci fa prendere in considerazione un tipo di simmetria spaziale della natura («le leggi fisiche non cambiano a seconda dell'orientamento nello spazio»), è possibile che quest'altro tipo di «rotazione» sia associato a un tipo diverso di simmetria? A questa domanda si riuscì a rispondere affermativamente attorno al 1971. La faccenda in realtà è molto intricata, ma l'idea di fondo è questa: se prendiamo in considerazione lo spin, esiste *una e una sola* ulteriore simmetria delle leggi di natura matematicamente possibile, nota come *supersimmetria.*[3] La supersimmetria ha una storia complicata. Oltre ai ricercatori citati nel testo, tra i primi proponenti dobbiamo ricordare tra gli altri R. Haag, M. Sohnius, J. T. Lopuszanski, Y. A. Gol'f and, E. P. Lichtman, J. L. Gervais, B. Sakita, V. P. AkuIov, D. V. Volkov e V. A. Soroka. Il loro lavoro è in parte documentato in Rosanne Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry,* Institute for Theoretical Physics, State University of New York at Stony Brook, preprint ITP-SB-8878.

La supersimmetria non può essere spiegata come un semplice e intuitivo cambiamento di «punto di vista» (cioè di *riferimento):* le traslazioni nello spazio e nel tempo, le trasformazioni dovute a cambiamenti di velocità o di orientamento spaziale esauriscono la lista delle possibilità. Ma poiché lo spin è una «rotazione con un tocco di meccanica quantistica», cosí la supersimmetria si può pensare associata a un cambiamento di riferimento in una «estensione quantistica dello spaziotempo». Le virgolette qui sono importanti, perché sottolineano che tutte queste affermazioni sono da prendere in senso molto lato.[4] Per il lettore un po' piú esperto, notiamo che questa estensione comporta l'aggiunta alle coordinate cartesiane dello spaziotempo di nuove coordinate quantistiche, diciamo u e v, che sono *anticommutanti:* $u \times v = - v \times u$. La supersimmetria allora si può pensare come una sorta di traslazione in questo nuovo spaziotempo esteso.

Anche se capire l'origine della supersimmetria non è affatto facile, ci concentreremo sulle sue conseguenze, e in particolare ci chiederemo se le leggi di natura devono rispettarla. Questo è molto piú semplice da spiegare.

Nei primi anni settanta ci si rese conto di questo fatto: se l'universo è supersimmetrico, allora le particelle devono presentarsi in *coppie il* cui spin differisce di 1/2. Queste coppie - sia se le si pensa come particelle puntiformi, sia se le si intende come stringhe - sono state battezzate *partner supersimmetrici.* Poiché le particelle materiali hanno spin 1/2 e le mediatrici delle tre forze non gravitazionali hanno spin 1, sembra che la supersimmetria accoppi in qualche modo queste due classi di particelle. Sembrerebbe una meravigliosa idea unificante, ma i problemi arrivano se ci si inoltra nei dettagli.

A metà degli anni settanta ci si era già accorti che *nessuna* delle particelle delle tabelle 1.1 e 1. 2 poteva essere accoppiata con un altra. Anzi, le analisi piú sofisticate mostravano che, se la supersimmetria è una proprietà dell'universo, allora tutte le particelle devono avere un partner supersimmetrico (per ora ignoto) il cui spin è 1/2 unità in meno. Ad esempio, deve esistere un partner con spin zero dell'elettrone, una particella ipotetica battezzata con il nome di *selettrone* (contrazione di « elettrone supersimmetrico»). Lo stesso deve essere vero per tutte le altre particelle: devono esistere i partner a spin zero del neutrino e dei quark, detti *sneutrino* e *squark;* e i partner a spin 1/2 delle particelle mediatrici: per i gluoni i g*luini,* per i fotoni i f*otini* e per i bosoni W e Z i w*inos* e gli *zinos.*

A guardar meglio, la supersimmetria sembra un pessimo affare: richiede di raddoppiare la nostra già ingombrante lista di particelle fondamentali. Visto che nessun partner supersimmetrico è mai stato scoperto, potreste essere tentati di reagire come Rabi a proposito del muone (vedi cap. I): «E chi l'ha ordinata, la supersimmetria?» Ci sono però buone ragioni - tre, per la precisione - per non disfarsi in modo cosí sommario di questo importante principio. Vediamole insieme.

4. L'importanza della supersimmetria nelle teorie di campo.

Prima di tutto c'è un bisogno estetico: i fisici non riescono a mandar giù il fatto che la natura rispetti quasi, ma non tutte, le simmetrie matematicamente possibili. Certo, può essere che le cose non stiano proprio cosí, ma sarebbe davvero un peccato. Come se Bach, dopo aver creato numerose voci meravigliosamente intrecciate, rinunciasse a sciogliere la linea melodica non scrivendo le ultime battute.

In secondo luogo, anche all'interno del modello standard, che ignora la gravità, la supersimmetria ci permette di risolvere abilmente alcune spinose questioni tecniche associate ai processi quantistici. Il problema è presto detto. Tutti i tipi di particelle danno il loro contributo all'agitazione quantistica che si manifesta a livello microscopico; il fatto è che in questo marasma certi processi continuano ad avere senso solo se i parametri numerici del modello standard sono precisi fino a una parte su un milione di miliardi, in modo da cancellare esattamente i piú perniciosi effetti quantistici. Per darvi

un'idea della scala, è come se dovessimo regolare un potente fucile per sparare un proiettile sulla Luna e colpire un bersaglio con un margine d'errore pari allo spessore di un'ameba. Anche se il modello standard permette misurazioni cosí precise, è a dir poco sospetto che una teoria debba dipendere dal cambiamento di una cifra quindici posti dopo la virgola.

[5] Per chi è interessato ai dettagli tecnici notiamo la cosa seguente. Nella nota 6 del capitolo VI abbiamo detto che il modello standard prevede l'esistenza del bosone di Higgs come elemento fornitore delle masse delle tabelle 1.1 e 1. 2. Perché questo funzioni, il bosone di Higgs non deve essere troppo pesante: secondo alcuni studi la sua massa non deve superare 1000 masse protoniche. Ma si scopre che le fluttuazioni quantistiche contribuiscono non poco alla massa dei bosone di Higgs, e hanno il potenziale di farla arrivare fino alla massa di Planck. Questo risultato mostrerebbe una falla nel modello standard, ma si è dimostrato che il problema può essere evitato se certi parametri (soprattutto la cosiddetta « massa nuda» *[bare mass]* del bosone di Higgs) sono tarati con una precisione di uno su 1015 per cancellare gli effetti di queste fluttuazioni quantistiche della massa del bosone di Higgs.

La supersimmetria dà una svolta alla faccenda. Le particelle a spin intero -dette *bosoni* in onore del fisico indiano Satyendra Bose - e quelle il cui spin è pari a metà di un numero dispari - i fermioni, cosí chiamati in onore di Enrico Fermi - danno contributi all'agitazione quantistica che si cancellano a vicenda: se le fluttuazioni di un bosone sono positive quelle di un fermione tendono ad essere negative e viceversa. Poiché la supersimmetria ci assicura che bosoni e fermioni sono sempre accoppiati, le cancellazioni finiscono con l'essere rilevanti e calmano l'agitazione quantistica. Nel *modello standard supersimmetrico* non c'è piú bisogno di una straordinaria esattezza dei parametri per far sí che l'impalcatura teorica resti in piedi. Questo sembra essere un aspetto molto tecnico, ma è convincente per molti ricercatori, che trovano cosí un'altra ragione in favore della supersimmetria.

Infine, il terzo motivo per non abbandonare la supersimmetria ci viene dalle cosiddette *teorie di grande unificazione.* Uno dei misteri della natura è dato senz'altro dalle intensità relative delle forze, che differiscono tra loro in modo anche enorme. La forza elettromagnetica è meno dell'1 per cento della forza nucleare forte, la forza debole è un migliaio di volte meno intensa dell'elettromagnetismo, e la gravità è circa cento milioni di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi (10-35) meno intensa ancora. Nel solco delle straordinarie ricerche che lo portarono al Nobel insieme con Salam e Weinberg (vedi cap. V), Glashow ipotizzò nel *1974,* assieme al collega Georgi, che non solo la forza elettromagnetica e quella debole fossero unite, ma che l'unione comprendesse anche quella forte. Questa «grande unificazione», che avrebbe riunito tre delle quattro forze fondamentali, aveva una differenza fondamentale rispetto alla teoria elettrodebole: laddove la forza elettromagnetica e quella debole rompono la simmetria quando la temperatura dell'universo scende a un milione di miliardi (1015) di gradi Kelvin, l'unificazione con la forza forte ha bisogno di temperature diecimila miliardi di volte piú elevate (1028 gradi Kelvin). Riscritto in termini energetici, questo numero si traduce in circa un milione di miliardi di masse protoniche, cioè solo quattro ordini di grandezza meno della massa di Planck. Con la loro proposta, Georgi e Glashow portarono coraggiosamente la fisica in regioni che nessuno aveva mai immaginato di poter esplorare.

I lavori successivi di Georgi, Helen Quinn e Weinberg a Harvard raffinarono ulteriormente le idee sulla potenziale unione delle tre forze non gravitazionali all'interno del modello di grande unificazione. Poiché si tratta di un contributo fondamentale anche ai giorni nostri, è bene spendere qualche riga per spiegarlo piú in dettaglio.

Sappiamo che la forza di attrazione elettrica tra due particelle di carica opposta, come quella gravitazionale tra due corpi dotati di massa, cresce al diminuire della distanza: sono fatti elementari e assai noti della fisica classica. Gli effetti quantistici, però, riservano anche in questo caso una sorpresa. Potremmo chiederci cosa c'entri la meccanica quantistica con l'intensità di una forza: la risposta, ancora una volta, sta nelle fluttuazioni quantistiche. Quando studiamo il campo elettrico generato da un elettrone, ad esempio, in realtà lo vediamo «offuscato» da una nube di continue, momentanee comparse di coppie particella-antiparticella e di altrettante annichilazioni, fenomeni che accadono in continuazione nella regione di spazio attorno all'elettrone. Già da tempo ci si è resi conto che questo ribollire di fluttuazioni oscura in un certo senso la forza elettromagnetica, proprio come la nebbia diminuisce la potenza di un faro. Osserviamo però che se ci avviciniamo all'elettrone penetriamo sempre piú profondamente in questa «nebbia » e quindi siamo meno soggetti al suo effetto di indebolimento. Questo fatto implica che la forza del campo elettrico di un elettrone *aumenta* al diminuire della distanza.

Questo aumento dovuto a effetti quantistici viene distinto da quello previsto dalla fisica classica parlando di forza *intrinseca* dei campo: la forza intrinseca elettromagnetica cresce al decrescere delle distanze. Quindi -ripetiamolo - la forza aumenta non solo perché lo prevede la teoria classica, ma perché avvicinandosi all'elettrone diventa sempre piú visibile

(sempre meno offuscato dalle fluttuazioni quantistiche) il suo campo intrinseco. Questa affermazione è vera per qualsiasi particella carica, ed è quindi possibile affermare che gli effetti quantistici fanno sì che la forza elettromagnetica aumenti al decrescere della distanza.

Cosa succede invece alle altre due forze non gravitazionali? Nel *1973* David Gross e Frank Wilczek, a Princeton, e indipendentemente David Politzer a Harvard, diedero una risposta sorprendente a questa domanda: la nuvola quantistica di apparizioni e annichilazioni di particelle *amplifica* la forza nucleare debole e quella forte. Questo significa che avvicinandoci alla sorgente del campo e penetrando piú a fondo dentro la nebbia quantistica, siamo meno soggetti all'effetto di amplificazione; quindi, entrambe le forze nucleari sono *meno intense* al decrescere delle distanze.

Georgi, Quinn e Weinberg partirono da questo risultato per portarlo a interessanti conseguenze. Secondo le loro ricerche, se si calcolano questi effetti quantistici con grande precisione, si trova che le tre forze non gravitazionali tendono ad avere intensità *uguali.* Sappiamo che le loro intensità sono molto diverse alle scale consuete accessibili con la normale tecnologia, ma secondo questa ipotesi ciò è dovuto solo agli effetti diversi che la nebbia quantistica ha su ciascuna forza. Secondo i calcoli di Georgi, Quinn e Weinberg, se esaminiamo le cose a una scala pari a un centesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo (10^{-29}) di centimetro (solo *5* ordini di grandezza in piú della lunghezza di Planck), penetriamo abbastanza dentro la nebbia per poter affermare che le tre forze sono uguali.

Le energie necessarie per raggiungere queste scale sono molto lontane da ciò che possiamo esperire nella vita quotidiana, ma sono state sicuramente raggiunte al tempo in cui l'universo era incredibilmente caldo e turbolento, quando la sua età era di 10^{-39} secondi e la sua temperatura di 10^{28} gradi Kelvin. Allo stesso modo in cui un insieme di ingredienti disparati (pezzi di metallo, rocce, pezzi di legno e cosí via) si fondono in un unico plasma omogeneo quando sono scaldati ad altissime temperature, cosí - secondo questi calcoli teorici - le forze nucleari debole e forte e quella elettromagnetica si fondono in un'unica forza in presenza di temperature inimmaginabili. Questo fatto è illustrato nel grafico della figura *7.*1.[6] A proposito della figura 7.1, si deve notare che abbiamo messo l'intensità della forza debole compresa tra quella forte e quella elettromagnetica, mentre avevamo detto prima che è meno intensa di entrambe. Il motivo sta nella tabella 1.2, dove vediamo che le particelle mediatrici della forza debole sono pesanti, mentre quelle delle altre forze sono prive di massa. L'intensità intrinseca della forza debole (misurata dalla sua costante di accoppiamento, che vedremo nel capitolo XII) è quella mostrata nella figura *7.*1, ma le sue massive particelle mediatrici sono delle scansafatiche, che fanno diminuire i suoi effetti. Nel capitolo XIV vedremo come la gravità si inserisce nella figura *7.*1

Anche se la tecnologia attuale non ci permette di arrivare a distanze cosí piccole o a temperature cosí immense, a partire dal *1974* le intensità relative delle tre forze sono state misurate con sempre maggiore precisione. Questi dati sono i punti di partenza delle tre curve nella figura *7.1,* e hanno reso possibili estrapolazioni sempre piú interessanti. Nel 1991 Ugo Amaldi del Cern, Wìm de Boer e Hermann Furstenau dell'Università di Karlsruhe hanno rifatto i calcoli di Georgi, Quinn e Weinberg tenendo conto di questi piú precisi risultati sperimentali, e si sono accorti di due cose importanti. In primo luogo, le tre forze non gravitazionali diventano quasi uguali a piccole distanze (o in modo equivalente ad alte energie o alte temperature), non proprio identiche, come si vede nella figura *7.2.* Secondariamente, questa piccola ma innegabile discrepanza si *annulla* se nei calcoli si tiene conto della supersimmetria. Questo perché i partner supersimmetrici delle particene note contribuiscono alla fluttuazione quantistica in modo tale da far sì che le intensità relative delle tre forze ritornino ad essere precisamente uguali.

Per molti ricercatori è davvero difficile pensare che la natura abbia scelto le forze in modo che convergessero «quasi, ma non del tutto» a livello microscopico. Sarebbe una crudeltà simile a quella di chi costruisce un enorme puzzle in cui un solo pezzo ha una piccola imperfezione e non si incastra bene con gli altri. La supersimmetria ha il potere di limare il pezzo al punto giusto in modo che tutto vada a posto.

Figura 7. 1 -

Grafico delle intensità delle tre forze non gravitazionali al diminuire della distanza su cui operano - o, in modo equivalente, al crescere dell'energia dei processi in cui intervengono.

Questa scoperta ci fornisce anche una possibile ragione del perché non siamo ancora stati in grado di scoprire un partner supersimmetrico delle particelle note. I calcoli fatti per verificare la convergenza delle forze - e altre considerazioni che qui non riportiamo - portano alla conclusione che queste ipotetiche particelle dovrebbero essere assai pesanti. Anche se non è possibile fare previsioni definitive, sembra che si debba trattare di mille masse protoniche, se non ancora di piú. Gli acceleratori a nostra disposizione non riescono a raggiungere energie di quest'ordine di grandezza e questa potrebbe essere una ragione per cui non abbiamo ancora visto sperimentalmente un partner supersimmetrico. Nel capitolo IX torneremo sulle questioni sperimentali e vedremo quali sono le strade possibili per dimostrare nel futuro prossimo se la supersimmetria è davvero una proprietà dell'universo.

Certo, le ragioni che abbiamo addotto a favore della supersimmetria (o perlomeno le ragioni per cui non dovremmo rifiutarla a priori) non sono a prova di bomba. La supersimmetria rende le nostre teorie il piú simmetriche possibili: ma potreste ribattere che l'universo non è affatto interessato a raggiungere la piú alta simmetria matematicamente possibile. La supersimmetria ci evita di calcolare con estrema precisione i parametri del modello standard per evitare spinosi problemi di natura quantistica: ma potreste ribattere che una teoria della natura potrebbe benissimo stare in bilico tra autoconsistenza e autodistruzione. La supersimmetria modifica il campo intrinseco delle tre forze non gravitazionali precisamente nel modo richiesto per far sì che queste convergano in una grande unificazione: potreste ancora ribattere che nulla di intrinseco, in natura, ci dice che queste forze debbano essere esattamente uguali. E potreste anche avanzare un'ipotesi alternativa, e molto piú facile, come spiegazione del fatto che i partner supersimmetrici non si lasciano scoprire: semplicemente perché l'universo non è supersimmetrico.

Nessuno può confutare queste obiezioni. Ma la teoria delle stringhe porta prove assai piú stringenti a favore della supersimmetria

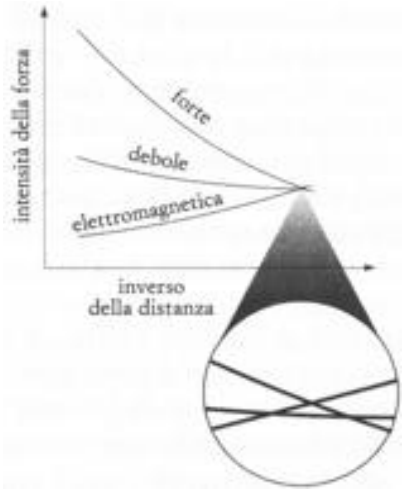

Figura 7.2.

Calcoli piú accurati dell'intensità rivelano che, senza supersimmetria, le tre forze non gravitazionali si incontrano «quasi», ma non del tutto.

5. La supersimmetria e la teoria delle stringhe.

La teoria delle stringhe nella formulazione originale di Veneziano del 1968 prevedeva tutte le simmetrie viste all'inizio del capitolo ma non la supersimmetria (che a dire il vero non era stata ancora scoperta). Questa prima ipotesi, piú precisamente, era una *teoria di stringa bosonica:* «bosonica» perché tutte le particelle che si originavano dai modi di vibrazione delle stringhe avevano spin intero, cioè erano bosoni, mentre non erano previsti spin pari a metà di un numero dispari, come accade nei fermioni. Questo comportava due problemi.

In primo luogo, se la teoria delle stringhe ha l'ambizione di incorporare tutte le forze e tutta la materia non può trascurare i fermioni, visto che tutte le particelle materiali sinora note hanno spin 1/2. In secondo luogo, il che era assai piú grave, si era scoperto che un modo di vibrazione dava origine a un bosone la cui massa (piú precisamente il suo quadrato) era *negativa: si* trattava del cosiddetto *tachione.* Anche prima della teoria delle stringhe, l'ipotesi dell'esistenza dei tachioni, in aggiunta alle particelle con massa positiva, era stata proposta da alcuni ricercatori, ma ci si era resi conto che questa idea comportava enormi difficoltà logiche nella teoria risultante. Allo stesso modo, all'interno della teoria delle stringhe, si cercò nei modi piú creativi di dare un senso all'esistenza del tachione, ma senza successo. Chiaramente la teoria bosonica, anche se era assai interessante, mancava ancora di qualche ingrediente essenziale.

Nel 1971 Pierre Ramond della University of Florida si mise a modificare la teoria bosonica per cercare di far rientrare nel quadro anche i fermioni. Grazie al suo lavoro e a quelli successivi di John Schwarz e André Neveu, si fece pian piano strada una nuova versione della teoria delle stringhe. E tra la sorpresa generale, nella teoria emendata i modi di vibrazioni fermionici e quelli bosonici sembravano presentarsi in coppie: a ogni bosone corrispondeva un fermione e viceversa. Nel 1977 le ricerche di Ferdinando Gliozzi, dell'Università di Torino, Joél Scherk e David Olive, dell'Imperial College, fecero luce sul fenomeno: si era scoperto che la teoria delle stringhe prevedeva la supersimmetria e l'accoppiamento bosone-fermione ne era un segno. Era nata la teoria delle stringhe supersimmetrica, cioè la teoria delle superstringhe. Il lavoro di Gliozzi, Scherk e Olive mostrava anche che il problema del tachione che affliggeva la teoria bosonica veniva superato nel contesto della nuova teoria. Pezzo dopo pezzo, il puzzle delle superstringhe stava prendendo forma.

Comunque, le ricerche di Ramond, Schwarz e Neveu avevano avuto un effetto dirompente soprattutto al di fuori della teoria delle stringhe. Nel 1973, Julius Weiss e Bruno Zumino dimostrarono che la supersimmetria - la nuova proprietà che saltava fuori dalla riformulazione della teoria delle stringhe - era applicabile anche all'interno di teorie classiche che prevedevano particelle puntiformi. Grazie ai loro lavori, la supersimmetria entrò sempre piú nel contesto delle teorie quantistiche di campo; e poiché questo settore era allora il piú battuto dai fisici di tutto il mondo - mentre le stringhe diventavano quasi una curiosità marginale - tutti si sguinzagliarono senza posa alla ricerca della cosiddetta *teoria quantistica di campo supersimmetrica. Il* modello standard supersimmetrico, di cui abbiamo parlato nel paragrafo precedente, è una delle punte di diamante di questo filone di ricerca; col senno di poi, possiamo vedere che il modello, attraverso i corsi e ricorsi storici, deve in realtà molto alla teoria delle stringhe.

Con la risurrezione delle superstringhe a metà degli anni ottanta, la supersimmetria è riaffiorata nel contesto della sua scoperta originaria. E all'interno della nuova teoria, le prove a favore della supersimmetria sono molto piú convincenti rispetto a quelle appena viste per la teoria puntiforme. La teoria delle stringhe è l'unico modo a noi noto per far coesistere relatività generale e meccanica quantistica, ma solo la sua versione supersimmetrica evita il disastroso problema del tachione e rende conto di tutte le particelle (fermioni compresi) che costituiscono il mondo che ci circonda. La supersimmetria dunque va a braccetto con la teoria quantistica della gravità resa possibile dalle stringhe, e con la sua proposta di grande unificazione di forze e materia. Se la teoria delle stringhe è corretta, allora ci si aspetta che lo sia anche la supersimmetria.

Fino a metà degli anni novanta, però, un problema assai fastidioso minacciava il futuro della teoria delle superstringhe.

6. Problemi di super-abbondanza.

Se qualcuno sostenesse di aver risolto un grande mistero - ad esempio quello dell'origine degli Etruschi - la vostra prima reazione potrebbe essere lo scetticismo; ma di fronte a una spiegazione ben documentata e del tutto logica potreste prestare attenzione e magari esserne convinti. Ma immaginate che subito dopo vi dicessero di avere in serbo una seconda spiegazione, e che, ascoltando pazientemente, vi accorgeste che anche questa alternativa è stringente e ben documentata. E non è finita: c'è una terza, una quarta e una quinta spiegazione, tutte diverse tra loro ma tutte ugualmente convincenti. Non c'è dubbio: alla fine della storia il mistero degli Etruschi rimarrebbe per voi impenetrabile come all'inizio. Nell'arena delle grandi teorie, il troppo stroppia.

Attorno al *1985* la teoria delle stringhe - nonostante il grande e giustificato entusiasmo che suscitava - si trovava in una situazione simile a quella appena immaginata. Ci si era resi conto, infatti, che la supersimmetria, diventata allora uno dei pilastri della teoria, poteva essere inclusa nella teoria delle stringhe non in uno ma in *cinque* modi diversi. Ogni metodo dava come risultato un accoppiamento di modi di vibrazione bosonici e fermionici, ma i dettagli di questo accoppiamento, e di molti altri fatti, erano fondamentalmente diversi. Anche se i nomi di queste cinque teorie supersimmetriche non sono poi cosí importanti, vale la pena ricordarli qui: sono la teoria di stringa di *tipo I,* di *tipo IIA,* di *tipo IIB, eterotica E8* x *E8* (in breve, *eterotica-E),* ed *eterotica O(32)* (in breve, *eterotica-O).* Tutte le caratteristiche della teoria delle stringhe viste fin qui sono valide in ognuna di queste versioni, che differiscono però nei dettagli piú minuti.

Trovarsi per le mani cinque variazioni di quella che avrebbe dovuto essere la TOE, la Teoria del Tutto, era un grande imbarazzo per i ricercatori. Così come ci deve essere una sola spiegazione del mistero degli Etruschi (che la si trovi o meno, non importa), ci aspettiamo che lo stesso avvenga per la nostra teoria piú profonda e fondamentale sul funzionamento del cosmo. Viviamo in un universo solo e vogliamo una spiegazione sola.

Un modo per risolvere l'impasse potrebbe essere questo: ci sono cinque diverse teorie delle superstringhe, scegliamone una grazie alle prove sperimentali e liberiamoci delle altre quattro. Ma anche se riuscissimo a farlo, continueremmo a chiederci perché mai esistano anche le quattro spiegazioni «scartate». Detto con l'ironia di Edward Witten: «Se una delle cinque teorie descrive il nostro universo, chi vive negli altri quattro?»[7] Edward Witten, conferenza tenuta in occasione della «Heinz Pagels Memorial Lecture Series», Aspen (Colorado) *1997.*

Il sogno di tutti i fisici è arrivare alla fine della ricerca con un'unica, singola, inevitabile conclusione. Idealmente la teoria «finale», sia quella delle stringhe o qualcos'altro, dovrebbe essere tale proprio perché non esistono altre possibilità. Se scoprissimo che esiste una sola teoria logicamente solida in grado di riassumere in sé la relatività generale e la meccanica quantistica, potremmo affermare con buona fede di aver raggiunto il livello di spiegazione piú profondo possibile del perché l'universo è fatto come è fatto e ha le proprietà che osserviamo. Sarebbe il paradiso della teoria unificata.[8] Per un approfondimento di questi concetti si veda Steven Weinberg, *Dreams of a Final Tbeory,* Pantheon, New York *1993* [trad. it. *Il sogno dell'unità dell'universo,* Mondadori, Milano *1993].*

Come vedremo nel capitolo XII, le ricerche piú recenti hanno fatto compiere alla teoria delle stringhe un passo da gigante in direzione della teoria finale: si è infatti dimostrato che le cinque versioni non sono che cinque modi diversi di descrivere *una stessa teoria onnicomprensiva.* La teoria delle stringhe, dopo tutto, può fregiarsi del marchio dell'unicità. Tutto sembra andare per il meglio; ma come vedremo nel prossimo capitolo, per arrivare all'unificazione attraverso la teoria delle stringhe dobbiamo abbandonare un altro, sostanzioso pezzo del nostro caro senso comune.

Capitolo ottavo
Dimensioni che l'occhio non vede

La relatività ristretta e quella generale risolsero due dei piú importanti problemi scientifici del secolo. E anche se la cosa non era prevedibile a priori, le nuove idee di Einstein comportarono un profondo rivolgimento nel modo di intendere lo spazio e il tempo. La teoria delle stringhe risolve il terzo grande conflitto del secolo, e anche in questo caso, in un modo che ad Einstein sarebbe probabilmente piaciuto, ci porta a rivedere radicalmente i nostri concetti di spazio e tempo. Le stringhe fanno vacillare le fondamenta della fisica moderna, tanto che persino un fatto universalmente noto e scontato come il numero di dimensioni dell'universo è rimesso in discussione in modo sorprendente e convincente.

1. L'esperienza inganna.

L'esperienza guida l'intuizione. Ma non solo: fornisce il quadro di riferimento nel quale analizziamo ed interpretiamo tutto ciò che percepiamo. Ad esempio, vi aspettate senz'altro che un «ragazzo selvaggio» allevato da un branco di lupi abbia una visione dei mondo assai diversa dalla vostra. Anche in situazioni meno estreme, come accade tra individui cresciuti in mezzo a culture assai diverse, vediamo come l'esperienza può determinare il nostro apparato interpretativo mentale.

Eppure ci sono cose di cui tutti facciamo esperienza, e sono proprio le credenze e le aspettative che deriviamo da questo insieme comune le piú difficili da scoprire e da mettere in discussione. Vediamo un esempio semplice ma significativo. Stanchi di leggere, posate il libro e vi alzate. In quante direzioni indipendenti potete muovervi? Tre: qualunque sia la vostra traiettoria, per complicata che sia, risulta dalla combinazione di moti attraverso le tre dimensioni, che potremmo chiamare «destra-sinistra », «avanti-indietro » e « su-giù ». Ogni passo, ogni movimento comporta una scelta implicita di moto in ciascuna di queste tre direzioni.

In modo equivalente, come abbiamo visto a proposito della relatività ristretta, si può dire che ogni punto dell'universo può essere individuato esattamente da tre numeri, che sono relativi alle tre dimensioni spaziali. Nell'esempio già f atto delle strade di Manhattan, ricorderete, questi tre dati sono il numero della strada (dimensione « avanti-indietro »), quello della avenue (dimensione «destra-sinistra») e quello del piano a cui vi trovate (dimensione «su-giù »). In una prospettiva piú moderna, come abbiamo visto, la relatività ci autorizza a considerare il tempo un'altra dimensione ancora (quella « futuro-passato »), il che ci dà un totale di quattro dimensioni per l'universo: un evento può essere individuato con quattro dati, che ci dicono dove e quando avviene.

Questa caratteristica dell'universo è cosí fondamentale, ovvia e pervasiva che sembra davvero impossibile metterla in discussione. Ma nel 1919 uno sconosciuto matematico polacco dell'Università di Kónigsberg, di nome Theodor Kaluza, ebbe l'audacia di sfidare l'ovvietà: ipotizzò infatti che l'universo avrebbe potuto avere piú dimensioni di quelle a tutti note. Ci sono ipotesi che sembrano sciocche e che si rivelano esserlo davvero. Ma ci sono idee apparentemente folli che riescono a minare le fondamenta della fisica. Anche se ci è voluto molto tempo perché fosse presa sul serio, l'ipotesi di Kaluza ha rivoluzionato il modo in cui sono formulate le leggi fisiche. Ancora oggi stiamo riavendoci dallo shock della sua incredibile, profetica idea.

2. L'idea di Kaluza e le precisazioni di Klein.

L'ipotesi secondo cui il nostro universo potrebbe avere pi più di tre dimensioni spaziali può suonare vana, stravagante o addirittura mistica. In realtà è concreta e assai plausibile. Per capire come sia possibile, abbandoniamo per un attimo la contemplazione dell'universo per rivolgere l'attenzione a un oggetto piú umile e familiare, come un tubo di gomma di quelli usati per innaffiare i giardini.

Immaginiamo che un tubo di gomma lungo qualche decina di metri sia teso sopra un avvallamento, e che noi osserviamo la scena da qualche centinaio di metri, come è mostrato nella figura *8.1a* Da quella distanza vediamo senza problemi la dimensione orizzontale del tubo, ma se non siamo dotati di vista eccezionale non riusciremo ad accorgerci del suo spessore. Dal nostro punto di osservazione, una formica che vive sul tubo ci sembrerebbe costretta a muoversi in una sola dimensione spaziale: quella sinistra-destra lungo l'estensione orizzontale del tubo. Se ci chiedessero di determinare la posizione della formica in un certo momento, ci basterebbe fornire un dato solo, cioè la sua distanza dal capo destro (o sinistro) del tubo. In sintesi: da lontano un oggetto lungo e stretto come un tubo di gomma sembra avere una sola dimensione.

In realtà sappiamo che il tubo ha un suo spessore. Dalla nostra distanza non lo vediamo a occhio nudo, ma basta usare un binocolo per accorgersene (come nella figura 8.1b). Grazie a questo ingrandimento ci accorgiamo che la formica che vive sul tubo ha in realtà *due* possibili direzioni indipendenti in cui muoversi: la sinistra-destra data d'alla lunghezza del tubo, di cui già ci eravamo accorti, e quella circolare, «oraria-antioraria», lungo la circonferenza del tubo stesso. Quindi per identificare la posizione della formica si devono fornire due dati e non uno: la sua distanza da uno dei capi del tubo e la sua posizione lungo la circonferenza. Questo riflette il fatto che la superficie del tubo è bidimensionale.[1] L'idea è semplice, ma le imprecisioni del linguaggio quotidiano possono creare confusione. In primo luogo, ipotizziamo che la formica sia confinata sulla *superficie* del tubo di gomma. Se l'insetto riuscisse a penetrare all'interno - trapassando la gomma - avremmo bisogno di tre numeri per specificare la sua posizione, perché dovremmo dire quanto in profondità è entrato. Invece, confinandolo sulla superficie, due numeri sono sufficienti. Certo, anche con questa limitazione potremmo scegliere di usare tre numeri: le normali dimensioni nel nostro spazio ordinario. Ma poiché sappiamo che la formica non può trovarsi che sulla superficie, due è il numero *minimo* di parametri necessari a precisare in modo univoco la sua posizione. Ecco cosa intendiamo dicendo che la superficie del tubo è bidimensionale.

C 'è comunque una bella differenza tra queste due dimensioni. La direzione della lunghezza del tubo è estesa e chiaramente visibile; l'altra, quella attorno al suo spessore, è piú piccola, «arrotolata » e difficile da scorgere. Per rendersi conto di quest'ultima, infatti, bisogna esaminare il tubo con una precisione assai maggiore.

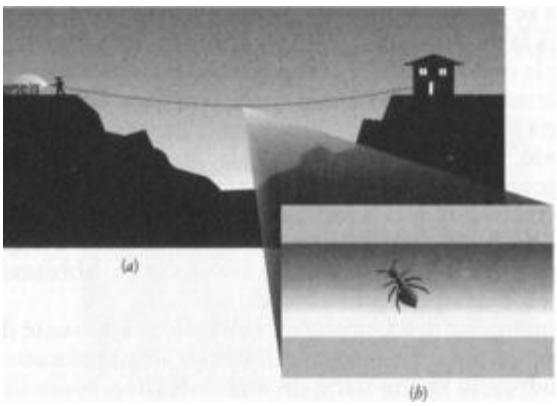

Figura 8. 1.

(a) Un tubo di gomma visto da grande distanza sembra un oggetto unidimensionale.

(b) Ingrandendo la figura, diventa visibile una seconda dimensione, quella a forma di cerchio arrotolata attorno al tubo.

Questo esempio mostra una caratteristica assai profonda e importante delle dimensioni spaziali, che sono sostanzialmente di due tipi: possono essere grandi, evidenti ed estese, oppure piccole, arrotolate e difficili da scorgere (con un termine un po' piú tecnico, queste si dicono *compattificate).* Certo, nel nostro esempio non abbiamo dovuto fare molta fatica per accorgerci della dimensione nascosta attorno allo spessore del tubo - è bastato un comune binocolo. Ma se il tubo fosse stato molto piú sottile (come un capello o un capillare sanguigno) la dimensione arrotolata sarebbe stata davvero difficile da scorgere.

In un lavoro spedito ad Einstein nel 1919, Kaluza avanzò un'ipotesi sorprendente: la struttura spaziale dell'universo può avere piú dimensioni delle tre che comunemente riconosciamo. Questa stranezza, come vedremo tra poco, serviva a uno scopo preciso: Kaluza si era infatti reso conto che in questo modo la relatività generale e l'elettromagnetismo potevano essere combinati in un unico quadro teorico, in modo assai elegante e convincente. Ma come la mettiamo con il fatto che le dimensioni spaziali sembrano essere proprio tre, non una di piú?

La risposta ~ ancora implicita nell'articolo di Kaluza e poi esplicitata dal matematico svedese Oskar Klein nel 1926 - è che nell'universo *possono esserci dimensioni estese e dimensioni arrotolate.* In altre parole, proprio come il tubo di gomma dell'esempio, l'universo ha dimensioni piú grandi ed evidenti, che sono le tre comunemente esperite; ma, come accade per lo spessore del tubo, l'universo può avere anche dimensioni aggiuntive, strettamente arrotolate in un piccolo spazio, cosí piccolo da essere sfuggito finora ai piú raffinati apparati sperimentali.

Per capire meglio quest'idea straordinaria, torniamo alla storia del nostro tubo di gomma. Ora il tubo presenta su tutta la sua lunghezza dei cerchietti dipinti di nero a distanza ravvicinata. Visto da lontano, come prima, ci sembra un oggetto lungo e sottile, dotato di una sola dimensione; ma se usiamo il binocolo, la dimensione extra, arrotolata, ci appare in tutta la sua evidenza grazie ai cerchietti neri (come si vede nella figura 8.2): la superficie del tubo ha dunque due dimensioni, una lungo la freccia orizzontale e una lungo quella circolare. Secondo Kaluza e Klein, l'universo presenta lo stesso fenomeno: ha tre dimensioni spaziali grandi ed estese, e una circolare piú piccola, per un totale di quattro. E difficile disegnare un oggetto quadridimensionale, quindi per amore di chiarezza dovremo limitarci a raffigurare due dimensioni estese e una arrotolata. Il risultato è mostrato nella figura 8.3, dove abbiamo ingrandito la trama dello spazio allo stesso modo in cui abbiamo usato il binocolo per vedere la superficie del tubo.

La prima immagine in basso mostra la struttura apparente dello spazio che ci circonda, a scale familiari (ad esempio, immaginiamo che i quadrati piú grandi della griglia siano un metro di lato). Nelle figure successive vediamo cosa succede «zoomando» su regioni sempre piú piccole, che ingrandiamo in modo progressivo. Al principio, a scale un po' piú piccole, non accade nulla o quasi: la struttura conserva la stessa forma di base che abbiamo visto in partenza. Ma se continuiamo il nostro viaggio verso il mondo piú microscopico - come mostrato al quarto livello nella figura 8.3 - ci appare evidente una dimensione extra, circolare, arrotolata strettamente, simile ai cappi di lana che danno spessore a un tappeto. Secondo Kaluza e Klein, questa dimensione aggiuntiva esiste *ovunque,* proprio come lo spessore del tubo è presente su tutta la sua lunghezza (per rendere la figura comprensibile, abbiamo disegnato solo un campione della dimensione extra, dato dai circoletti posti alle intersezioni delle griglia che rappresenta le dimensioni estese). Nella figura 8.4 vediamo un ulteriore ingrandimento della struttura microscopica dello spazio, secondo la visione di Kaluza e Klein.

Le similarità con l'esempio del tubo di gomma sono evidenti, ma non mancano fondamentali differenze. L'universo ha tre dimensioni spaziali estese (anche se ne abbiamo disegnate solo due), non una come il tubo; cosa assai piú importante, ora stiamo parlando di *tutto l'universo,* non di un oggetto come il tubo di gomma che esiste all'interno dell'universo. L'idea di fondo, comunque, resta la stessa: come accade per lo spessore del tubo, se la dimensione extra, arrotolata, dell'universo è molto piccola, è assai piú difficile da scorgere rispetto alle tre dimensioni estese e manifeste. Anzi, può essere abbastanza piccola da sfuggire anche ai nostri piú potenti strumenti di ingrandimento. Soprattutto, la dimensione extra dell'universo non è un semplice «bozzo» circolare innestato sulle altre, come la figura 8.4 potrebbe farvi credere: è una *nuova* dimensione, che esiste ovunque all'interno dell'universo a noi familiare, esattamente come le tre direzioni che si possono specificare in ogni punto (destra-sinistra, avanti-indietro, su-giú). Lungo questa nuova direzione potrebbe tranquillamente muoversi una formica, se fosse abbastanza piccola. Per identificare la posizione nello spazio di questa microscopica formichina avremmo bisogno di *quattro* parametri: tre per localizzarla nelle dimensioni estese (quelle della griglia in figura) e uno per la sua posizione nella dimensione extra (i cerchietti). Aggiungendo il parametro temporale, vediamo che le dimensioni dello spaziotempo diventano cinque, una in piú di quelle che ci aspetteremmo.

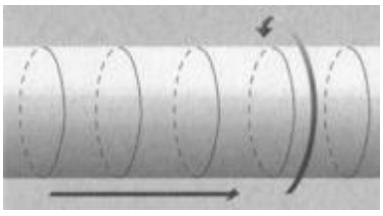

Figura 8.2.

La superficie del tubo di gomma è bidimensionale: una dimensione (evidenziata dalla freccia diritta) è quella orizzontale, lunga e rettilinea; l'altra è quella circolare (rappresentata dalla freccia arcuata), corta e avvolta su se stessa.

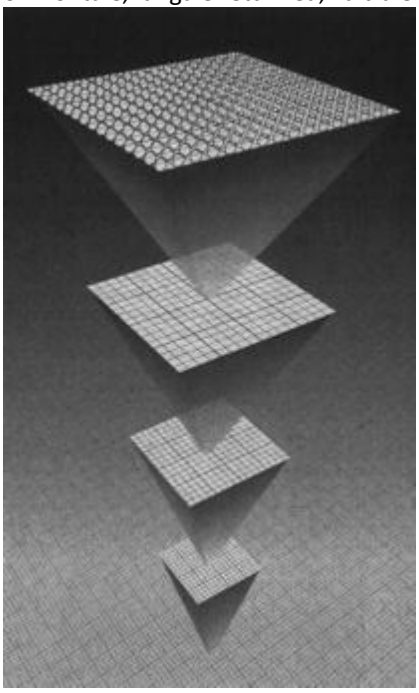

Figura 8.3.

Come nella figura 5. 1, ogni livello 'rappresenta un forte ingrandimento della struttura spaziale precedente. Il nostro universo può avere dimensioni extra - come si vede al quarto livello - arrotolate su se stesse (compattificate) in uno spazio talmente piccolo da essere finora sfuggite all'osservazione diretta.

Per sorprendente che possa essere, l'idea di Kaluza e Klein ci mostra che l'esistenza di tre dimensioni spaziali estese e manifeste non preclude quella di altre dimensioni arrotolate, purché siano davvero molto piccole. Nell'universo ci potrebbero essere davvero piú dimensioni di quelle che saltano agli occhi.

Cosa intendiamo per «piccole»? La nostra tecnologia piú avanzata ci permette di arrivare fino a un miliardesimo di miliardesimo di metro. Se la dimensione extra è arrotolata in uno spazio piú piccolo di questo, non siamo dunque in grado di vederla. Nel 1926 Klein prese l'idea iniziale di Kaluza e la combinò con quello che stava saltando fuori dal nascente campo della meccanica quantistica. Secondo i suoi calcoli, la dimensione extra dovrebbe essere grande piú o meno quanto la lunghezza di Planck, in un ordine di grandezza molto lontano da quelli accessibili sperimentalmente. Da allora, l'idea secondo cui potrebbero esistere altre dimensioni aggiuntive è stata battezzata *teoria di Kaluza-Kiein.*[2] Sorprendentemente, Savas Dimopoulos, Nima Arkani-Hamed e Gia Dvali, riprendendo le idee di Ignatios Antoniadis e Joseph Lykken, hanno mostrato che se anche esistesse una dimensione extra grande un millimetro, è possibile che non possa essere vista sperimentalmente. Il motivo sta nel fatto che gli acceleratori di particelle sondano il mondo microscopico grazie alle forze nucleari e quella elettromagnetica; quella gravitazionale, essendo quasi inesistente alle energie tecnicamente accessibili, viene generalmente ignorata. Ma secondo Dimopoulos e i suoi collaboratori, se la dimensione compattificata è importante soprattutto per il campo gravitazionale (cosa che può essere plausibile, a volte, nella teoria delle stringhe), allora tutti gli esperimenti fatti finora potrebbero averla non vista. Sono allo studio nuovi test sensibili al campo gravitazionale per cercare queste ipotetiche dimensioni «grandi». Se ottenessero un risultato positivo sarebbe una delle scoperte piú importanti di ogni tempo.

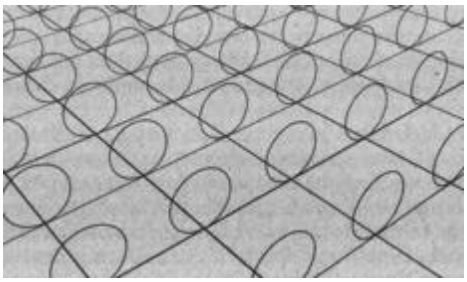

Figura 8.4.

La griglia rappresenta le dimensioni estese di cui facciamo comunemente esperienza, mentre i cerchi sono una dimensione extra, piccola e compattificata. Come gli avvolgimenti dei fili di un tappeto, i cerchi sono presenti in tutti i punti dello spazio consueto, anche se qui per semplicità li abbiamo disegnati solo alle intersezioni di una griglia.

3. Su e giù per il Tubuniverso.

L'esempio materiale del tubo di gomma e la figura 8.3 dovrebbero darvi un'idea del perché sia possibile che il nostro universo abbia altre dimensioni oltre a quelle visibili. Ma anche per chi si occupa di questa materia professionalmente, è difficile visualizzare un universo multidimensionale. Per questo motivo è bene affilare la nostra intuizione passando ad immaginare come sarebbe la nostra vita all'interno di un mondo fantastico in cui ci sono *meno* dimensioni del consueto seguendo la strada tracciata dal delizioso libretto di Edwin Abbott *Flatlandia,* del 1884 [3] Cfr. Edwin Abbott, *Flatland,* Princeton University Press, Princeton *199* 1 [trad. it. *Flatlandia,*Adelphi, Milano 1988].e cercando di capire come potrebbe cambiare la nostra percezione se ci accorgessimo pian piano dell'esistenza di altre dimensioni nascoste. Proviamo a pensare a un mondo bidimensionale simile al tubo di gomma visto prima. Per immedesimarci nell'esempio dobbiamo spogliarci del ruolo di osservatore esterno, che vede il tubo come un oggetto all'interno del nostro universo: nel nostro nuovo *Tubuniverso,* la superficie di un lungo tubo di gomma (che possiamo pensare infinitamente lungo) è *tutto quello che esiste,* e noi siamo come formichine vincolate a muoversi su questa superficie.

Rendiamo le cose ancora piú estreme. Immaginiamo che la dimensione circolare del Tubuniverso sia microscopica, tanto che nessuno di noi ne sospetti l'esistenza. Tutti noi abitanti di questo mondo siamo invece convinti di una cosa cosí evidente da essere un fatto fondamentale della vita: il nostro universo ha *una* dimensione spaziale (se nascesse un Einstein locale, direbbe che le dimensioni sono due, una spaziale e una temporale), ed è per questo che noi *Lineometti lo* chiamiamo *Linelandia.*

La vita a Linelandia è assai diversa da quella a cui siamo abituati. Il nostro corpo, ad esempio, non ci sta proprio in questo universo: possiamo modificarlo e rimodellarlo quanto vogliamo, ma non possiamo liberarci del fatto che ha una lunghezza, una larghezza e uno spessore, cioè si estende in tre dimensioni. A Linelandia non c'è spazio per queste stravaganze. Ricordatevi infatti che, anche se la vostra immagine mentale è ancora legata all'idea di un lungo oggetto filiforme immerso nel nostro spazio consueto, qui stiamo parlando di un *altro universo,* che è tutto ciò che esiste. Come abitanti di Linelandia, dobbiamo adattarci alla sua estensione spaziale. Provate a immaginarlo: non basta farsi piccoli come una formica, ma bisogna assottigliarsi piú di un verme, fino ad arrivare a non avere spessore. Per vivere a Linelandia bisogna avere solo una dimensione, la lunghezza.

Ora immaginiamo che gli abitanti di questo mondo abbiano un occhio a ciascuna estremità del corpo. Non sono occhi umani, che possono vedere in tre dimensioni, ma occhi immobili, che possono soltanto fissare nelle due diverse direzioni unidimensionali. Attenzione: non si tratta di una limitazione anatomica, ma del semplice fatto che, essendoci una sola dimensione nell'universo, non ci sono altre direzioni in cui gli occhi possano guardare. Tutto il contenuto di Linelandia si stende solo lungo l'asse avanti-indietro.

Potremmo provare ad immaginare altre caratteristiche della vita a Linelandia, ma presto ci accorgeremmo che non c'è molto da dire. Per esempio, se un altro Lineometto si para davanti a noi, ci accorgiamo della sua presenza perché ne vediamo l'occhio che si trova dalla nostra parte; e l'occhio, in realtà, non sarà che un puntino. Gli occhi, a Linelandia, non hanno colore e non esprimono emozioni: non c'è proprio spazio per queste cose cosí familiari. E come se non bastasse,

l'immagine dell'occhio del nostro vicino ci accompagnerà *sempre.* Se ci mettiamo in testa di oltrepassarlo e di esplorare il resto di Linelandia, ci attende un'amara delusione: non è possibile farlo, perché il suo corpo occupa tutta la strada, e non esiste « altro spazio» per poterlo aggirare. I Lineometti sono sparsi per Linelandia con un ordine fissato e immutabile. Che barba!

Un paio di migliaia di anni dopo un certo evento religioso linelandiano, un Lineometto di nome Kaluza Klinea porta la speranza ai suoi depressi compagni. Per ispirazione divina, o per reazione alla noia di dover fissare sempre l'occhietto puntuto del vicino, ha avuto un'idea: forse Linelandia non è affatto un mondo unidimensionale. Magari esiste una seconda dimensione spaziale circolare , cosí piccola che è sempre sfuggita all'osservazione. Se questa nuova dimensione si espandesse - il che non è impossibile, come mostrano i recenti lavori del suo collega Lineinstein - il nuovo universo che ne risulterebbe sarebbe meraviglioso, ricco di gioia e speranza: un universo in cui i Lineometti possono sorpassarsi liberamente, facendo uso della nuova dimensione, un universo in cui finisce la schiavitù della posizione fissa. Il dottor Kaluza Klinea, insomma, sta immaginando che il Tubuniverso diventi piú «spesso».

Se la dimensione circolare si gonfiasse, trasformando Linelandia nel vero Tubuniverso, la nostra vita cambierebbe in modo radicale. Pensiamo al nostro corpo. Per un Lineometto, l'interno del corpo è tutto ciò che sta tra i due occhi, che assolvono quindi a una funzione analoga alla pelle per il corpo umano. Gli occhi sono la barriera tra esterno e interno; un dottore può esplorare l'interno del corpo solo « pungendo » gli occhi, e in questo modo avviene la chirurgia a Linelandia.

Ed ora immaginiamo che il sogno di Kaluza Klinea si avveri: la dimensione nascosta si espande fino a diventare visibile. Ora un altro Lineometto ci può vedere di lato e quindi dare un'occhiata alle nostra interiora (come si vede nella figura 8.5). Un chirurgo è quindi in grado di operare senza tagli. Che stranezza! Non c'è dubbio che col tempo noi Lineometti ci evolveremo, fino a sviluppare una membrana che in qualche modo protegga l'interno del corpo dal contatto con il mondo esterno. Anzi, è quasi certo che diventeremo bidimensionali: creature piatte, dotate di lunghezza e larghezza, che scivolano sulla superficie del Tubuniverso come è mostrato nella figura 8.6. Se la dimensione extra crescesse ancora, fino a dare la sensazione di una superficie bidimensionale piatta, ci troveremmo nella Flatlandia immaginata da Abbott, un mondo ricco di cultura e stranezze, in cui vige un curioso (e ironico) sistema di caste basato sulla forma geometrica degli individui. E' difficile immaginare che succeda qualcosa di interessante in Linelandia, perché manca lo spazio per quasi tutto; viceversa, la vita sul Tubuniverso diventa ricca di potenzialità. Il salto da una a due dimensioni è davvero rivoluzionario.

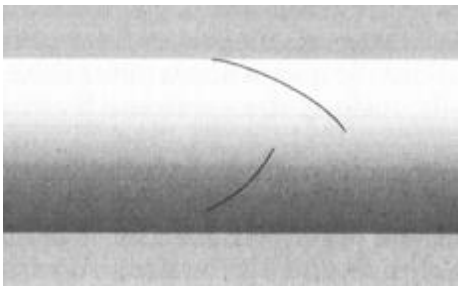

Figura 8.5.
Un Lineometto può vedere l'interno del corpo di un altro quando Linelandia si espande e diventa il Tubuniverso.

E perché dovremmo fermarci qui? L'universo bidimensionale potrebbe avere a sua volta una dimensione arrotolata da qualche parte, e dunque essere segretamente tridimensionale. La figura 8.4 ci mostra proprio questa situazione: ora però dobbiamo immaginare che le due dimensioni estese siano tutte e sole quelle esistenti (e non rappresentino le tre dimensioni consuete, come abbiamo fatto prima a livello di artificio grafico). Se la dimensione circolare si espandesse, una creatura bidimensionale si troverebbe immersa in un nuovo mondo, in cui il movimento non si limita alle direzioni avanti-dietro e sinistra-destra, ma è possibile anche su e giù, lungo il cerchio. Se la dimensione aggiuntiva diventasse abbastanza grande, questo potrebbe essere il nostro universo. In realtà non sappiamo se una delle tre dimensioni consuete a un certo punto si incurvi, assumendo la forma di una gigantesca circonferenza non osservabile anche dai piú potenti telescopi. Se i cerchi della figura 8.4 fossero grandi, ad esempio, molti miliardi di anni luce, quella potrebbe essere una rappresentazione corretta del nostro universo.

Ed ora il ritornello si ripete: perché fermarci qui? Eccoci arrivati all'idea di Kaluza e Klein: il nostro universo tridimensionale potrebbe avere una quarta dimensione spaziale arrotolata, segreta, inaspettata. Se questo fosse vero (o meglio, come vedremo ora, se fosse vera la sua generalizzazione a molte dimensioni aggiuntive) e se le nuove dimensioni si espandessero fino ad essere visibili, è chiaro dagli esempi appena visti che la vita cosí come la conosciamo adesso cambierebbe radicalmente.

Ma c'è un fatto sorprendente: le dimensioni extra, anche, se rimanessero arrotolate e quindi invisibili, avrebbero comunque conseguenze importanti.

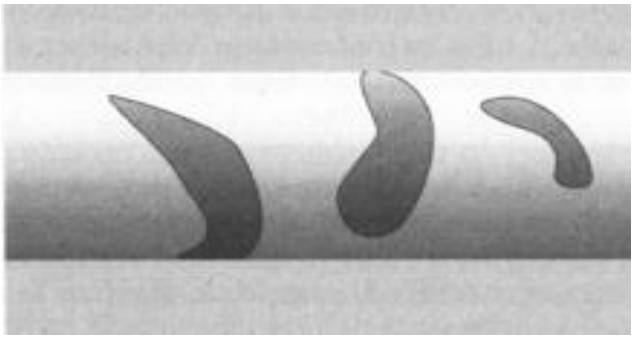

Figura 8.6.
Gli esseri bidimensionali che abitano il Tubuniverso.

4. L'unificazione a piú dimensioni.

L'idea originaria di Kaluza del 1919 era senz'altro interessante di per sé; ma c'era qualcos'altro che la rendeva ancora piú importante. Einstein aveva formulato la relatività generale nel quadro familiare di un universo dotato di tre dimensioni spaziali e una temporale. Il formalismo matematico della sua teoria, però, si poteva estendere in modo abbastanza diretto a dimensioni superiori. Sotto la « semplice » ipotesi che esistesse una dimensione spaziale in piú, Kaluza si mise al lavoro e dedusse in modo esplicito un nuovo insieme di equazioni per la relatività generale.

Nella sua nuova formulazione, le equazioni che si riferivano alle tre dimensioni ordinarie erano essenzialmente identiche a quelle originali di Einstein. Ma la dimensione extra, come è lecito aspettarsi, dava luogo ad altre equazioni aggiuntive. Studiandole, Kaluza si accorse che stava succedendo qualcosa di sorprendente: le nuove formule non erano altro che quelle scritte da Maxwell attorno al 1880 per descrivere la forza elettromagnetica! Aggiungendo una dimensione, si unificavano la teoria della gravità di Einstein e la teoria della luce di Maxwell.

Prima di allora, non si pensava che ci fosse alcuna correlazione tra queste due forze, perché non si era mai avuto il minimo indizio dell'esistenza di un legame. Grazie alla sua idea coraggiosa e creativa, Kaluza mostrò che un qualche legame, un legame profondo, esisteva davvero: sia la gravità sia l'elettromagnetismo curvano e piegano lo spazio. La gravità ha effetti visibili nelle tre dimensioni familiari, mentre l'elettromagnetismo si manifesta con deformazioni lungo la dimensione nascosta.

Kaluza inviò il suo lavoro ad Einstein, che in un primo tempo ne fu assai incuriosito. Il 21 aprile 1919 gli rispose con una lettera, in cui diceva di non avere mai pensato al fatto che l'unificazione sarebbe potuta avvenire «in un mondo cilindrico a cinque dimensioni [quattro spaziali e una temporale] [...] A prima vista la Sua idea mi piace immensamente»'[4]
Lettera di Einstein a Kaluza citata in Abraham Pais, *«Subtle is the Lord»: The Science and Life of Albert Einstein,* Oxford University Press, Oxford *1982, P. 330* [trad. it. *«Sottile è il Signore ... » La scienza e l'opera di Albert Einstein,* Boringhieri, Torino *1986, P. 335].*

Piú o meno una settimana dopo, però, Einstein scrisse un'altra lettera a Kaluza in cui si mostrava piú scettico: «Ho letto con attenzione il Suo articolo e lo trovo davvero interessante. Non mi pare di scorgervi impossibilità logiche. D'altro canto, devo ammettere che i Suoi argomenti non mi sembrano per ora abbastanza convincenti».

[5] Lettera di Einstein a Kaluza citata in D. Freedman e P. van Nieuwenhuizen, *The hidden dimension of spacetime,* in «Scientific American», n. 252 (1985), p. 62 [trad. it. *Le dimensioni nascoste dello spazio-tempo,* in «Le Scienze», n. 201 (1985), P. 94].

Ma piú di due anni dopo, il 14 ottobre 1921, Einstein scrisse ancora al collega, evidentemente dopo aver avuto il tempo di digerire la novità: « Sto ripensando al fatto di averLe sconsigliato di rendere pubblica la Sua idea circa l'unificazione di gravitazione ed elettricità, due anni or sono [...] Se lo desidera, presenterò il Suo articolo all'Accademia».[6] *Ibid.*

Pur con un certo ritardo, Kaluza aveva ricevuto l'approvazione del maestro.

Anche se l'idea era assai elegante, l'ipotesi di Kaluza si rivelò a uno studio piú accurato, e grazie anche ai contributi di Klein, in netto contrasto con i dati sperimentali. Il semplice tentativo di includere l'elettrone nella nuova teoria si scontrava con il fatto che il rapporto tra la sua massa e la sua carica previsto dai calcoli era ben lontano da quello effettivamente misurato. Poiché non sembrava esserci un modo di risolvere questi problemi, molti dei fisici che avevano letto il lavoro di Kaluza persero ogni interesse a proseguire su quella strada. Einstein e qualche altro collega ritornarono, ogni tanto, a cullarsi con l'idea delle dimensioni nascoste, ma presto questa ipotesi divenne del tutto marginale.

Kaluza era davvero troppo avanti per i suoi tempi. Gli anni venti furono un periodo d'oro per la fisica sia sperimentale sia teorica, in cui tutti cercavano di comprendere il comportamento del mondo microscopico. I teorici erano occupati a scrivere la struttura di fondo della meccanica quantistica e della prima teoria di campo quantistica; gli sperimentali dovevano scoprire nei minimi dettagli le proprietà degli atomi e di molti altri costituenti elementari della materia. La teoria guidava gli esperimenti, e questi ultimi contribuivano ad affinare le teorie: cosí per cinquant'anni, fino all'arrivo del modello standard. Non c'è da stupirsi se le speculazioni sulle dimensioni nascoste rimanessero nel dimenticatoio durante questi anni frenetici e produttivi. Con i fisici impegnati a esplorare le meraviglie dei metodi quantistici, che fornivano previsioni sperimentalmente verificabili, non c'era molto interesse nei confronti di una possibile dimensione nascosta, confinata in un mondo in cui nessuno poteva avere accesso anche con i piú potenti strumenti.

Ma prima o poi tutti gli entusiasmi si raffreddano. Tra la fine degli anni sessanta e l'inizio dei settanta, l'impalcatura teorica del modello standard era completata. Una decina di anni dopo molte delle sue previsioni erano già state verificate dagli esperimenti e i fisici erano quasi tutti convinti che la conferma definitiva del modello sarebbe arrivata di lì a poco. Certo, c'erano dettagli non secondari ancora da risolvere, ma la sensazione comune era che le domande fondamentali circa la natura delle forze nucleari e di quella elettromagnetica avevano trovato risposta.

Il tempo era maturo per ritornare al problema dei problemi: l'enigmatico conflitto tra meccanica quantistica e relatività generale. I fisici erano riusciti a formulare una teoria quantistica per tre delle quattro forze della natura e si sentivano abbastanza baldanzosi per tentare di mettere anche la quarta, la gravità, nel carniere. Dopo aver provato molte strade rivelatesi tutte fallimentari, la comunità dei ricercatori cominciò a guardare con minor scetticismo anche alle idee piú rivoluzionarie. Fu cosí che la teoria di Kaluza-Klein, dopo cinquant'anni d'oblio, fu resuscitata.

5. La nuova teoria di Kaluza-Klein.

La fisica era molto cambiata nei sessant'anni trascorsi tra la proposta originaria di Kaluza e la fine degli anni settanta. La meccanica quantistica era stata formulata in ogni dettaglio e verificata sperimentalmente. Le forze nucleari forte e debole, sconosciute negli anni venti, erano state scoperte e analizzate. Secondo alcuni, l'ipotesi di Kaluza si era dimostrata sbagliata proprio perché lui non conosceva l'esistenza di queste forze e quindi era stato troppo *conservatore* nella sua ristrutturazione dello spazio: piú forze hanno bisogno di piú spazio, quindi di piú dimensioni. Un'unica dimensione aggiuntiva, anche se riusciva a mostrare qualche barlume dell'unione tra gravità ed elettromagnetismo, non era abbastanza.

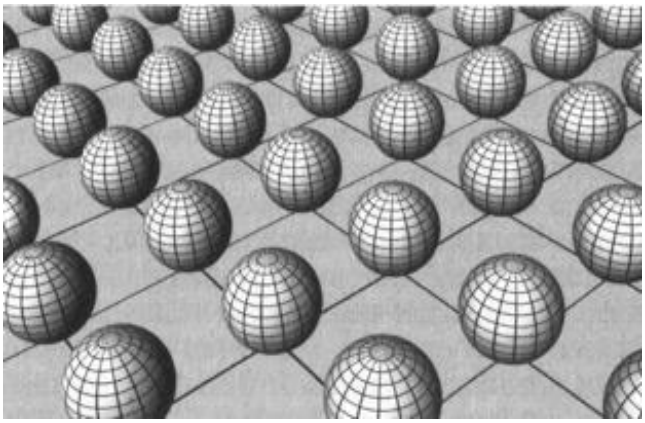

Figura 8.7.
Due dimensioni extra arrotolate in forma di sfera.

Verso la metà degli anni settanta le ricerche si stavano ormai dirigendo verso modelli dotati di molte dimensioni aggiuntive. Un esempio è mostrato nella figura 8.7: qui le dimensioni extra sono due, arrotolate a formare la superficie di una sfera. Come nel caso della figura 8.4, le sferette sono da immaginare presenti in ogni punto dello spazio, anche se qui per amor di chiarezza ne abbiamo disegnato solo un campione alle intersezioni della griglia delle dimensioni estese. Oltre a pensare al numero di dimensioni extra, si possono anche immaginare varie forme. Nella figura 8.8, ad esempio, abbiamo raffigurato le due dimensioni aggiuntive sotto forma di « ciambelle », che matematicamente si dicono «tori». Anche se esulano dalla nostra capacità di disegnarle, possiamo immaginare situazioni ancora piú complicate in cui ci sono tre, quattro, cinque o quante altre ancora dimensioni nascoste, arrotolate in un'ampia gamma di forme esotiche. Il fatto essenziale è che tutte queste nuove dimensioni devono essere confinate in una regione di spazio piú piccola di quella che possiamo sondare sperimentalmente, visto che nessuno si è mai accorto della loro esistenza.

Le piú interessanti tra le proposte per le dimensioni extra erano quelle che prevedevano la supersimmetria. Nelle speranze dei ricercatori, la cancellazione parziale delle oscillazioni quantistiche dovuta all'esistenza dei partner supersimmetrici avrebbe reso meno radicali le ostilità tra meccanica quantistica e relatività generale. Le teorie che riuscivano a comprendere gravità, dimensioni extra e supersimmetria furono battezzate teorie di *supergravità in piú dimensioni* (vedi capitolo XII).

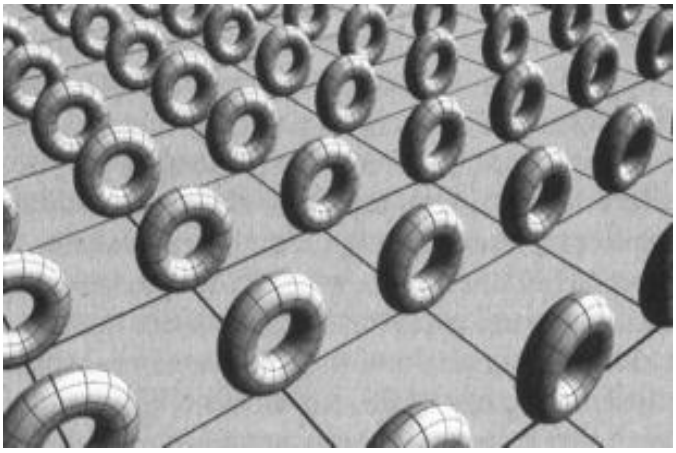

Figura 8.8.
Due dimensioni extra arrotolate in forma di ciambella (o toro).

Cosí come era successo per le idee di Kaluza, molte di queste teorie suscitarono speranze premature. Le nuove equazioni che saltavano fuori erano davvero molto simili a quelle impiegate per l'elettromagnetismo e per le forze nucleari; ma un esame piú attento rivelava che i problemi persistevano. Fondamentalmente, le rovinose fluttuazioni quantistiche

a livello microscopico erano sì moderate dalla supersimmetria, ma non abbastanza da dar luogo a una teoria sensata. Era difficile trovare un'unica teoria logica e consistente, basata sull'idea delle dimensioni extra, che comprendesse tutte le caratteristiche della materia e delle forze.[7] La cosa piú difficile del modello standard da riformulare in piú dimensioni è la cosiddetta chiralità. Per non appesantire la discussione non abbiamo introdotto questo concetto nel testo, ma per chi fosse interessato ne accenniamo brevemente qui. Immaginate che vi mostrino il film di un esperimento scientifico e che dopo vi sia posta questa stravagante domanda: il filmato mostrava gli eventi ripresi direttamente, oppure riflessi attraverso uno specchio ? Se l'operatore è esperto, non sembra ci sia modo di accorgersene. In realtà si può rispondere, purché l'esperimento sia di un certo tipo. A metà degli anni cinquanta le ricerche teoriche di T. D. Lee e C. N. Yang, e i risultati sperimentali di C. S. Wu, mostrarono che le leggi dell'universo non sono perfettamente simmetriche se viste attraverso uno specchio, nel senso che la versione speculare di alcuni fenomeni - quelli direttamente dipendenti dalla forza debole *non può accadere* nel nostro mondo. Quindi, se nel film vedete uno di questi eventi proibiti, potete affermare che dell'esperimento è stata filmata l'immagine allo specchio. Gli specchi scambiano la destra con la sinistra e quindi Lee, Yang e Wu hanno scoperto che l'universo non è perfettamente simmetrico rispetto all'inversione destra-sinistra: in linguaggio tecnico, si dice che l'universo è *chirale.* Questa caratteristica del modello standard è stata, come dicevamo, molto difficile da tradurre in ambito multidimensionale. Per evitare fraintendimenti, avviso che nel capitolo X parleremo di un concetto tipico della teoria delle stringhe noto come «simmetria speculare», ma l'uso della parola «speculare» in quel contesto non ha niente a che fare con quanto visto qui.

Divenne sempre piú chiaro che la «vera» teoria unificata stava affiorando a spizzichi e bocconi, ma che mancava ancora un ingrediente fondamentale in grado di legare il tutto in modo compatibile con la meccanica quantistica. Nel 1984 l'ingrediente mancante fece il suo ingresso trionfale e si prese tutto il palcoscenico: era la teoria delle stringhe.

6. Le dimensioni extra e la teoria delle stringhe.

Arrivati a questo punto siamo quasi convinti che l'universo *potrebbe* avere delle dimensioni in piú; finché rimangono abbastanza piccole, non c'è nulla che lo vieti in linea di principio. Ma le dimensioni extra possono sembrare un puro artificio. Il fatto che l'uomo sia incapace di verificare che cosa accade a distanze inferiori a un miliardesimo di miliardesimo di metro ci permette di pensare a ciò che vogliamo: non solo a minuscole dimensioni arrotolate strettamente, ma anche a microscopici mondi popolati da ometti verdi. Certo, la prima ipotesi sembra piú razionale della seconda, ma il postulare queste realtà non verificabili - allo stato attuale delle cose - sembra comunque un atto di arbitrio.

Questo poteva essere vero fino all'arrivo della teoria delle stringhe. E una teoria che risolve il problema centrale della fisica contemporanea (il conflitto tra meccanica quantistica e relatività generale) e che riunisce in un quadro coerente tutto ciò che sappiamo sulla materia e sulle forze della natura: ma per fare tutto ciò la teoria *ha bisogno* delle dimensioni aggiuntive.

Ecco il motivo. Una delle idee centrali della meccanica quantistica è il fatto che la nostra capacità di prevedere il futuro è limitata ad affermazioni del tipo «il tale risultato si avrà con la tale probabilità». Anche se ad Einstein questo sembrava un aspetto disgustoso delle moderne teorie, e anche se voi foste d'accordo con lui, sembra proprio che le cose stiano cosí. Accettiamolo. Ora, sappiamo che la probabilità di un evento è un numero compreso tra 0 e 1 (in modo equivalente, se pensiamo in termini percentuali, tra 0 e 100). I fisici si accorgono che una certa teoria sta dando i numeri soprattutto da un fatto: quando certi calcoli danno come risultato valori, che si suppongono di probabilità, al di fuori di questo intervallo accettabile. Ad esempio, abbiamo già ricordato che l'incompatibilità tra meccanica quantistica e relatività generale, nel quadro di una teoria che prevede particelle puntiformi, si manifesta con valori di probabilità infiniti; e abbiamo anche visto che la teoria delle stringhe risolve questo problema. Ma non abbiamo detto che rimane ancora un problemino piú subdolo. Nei primi tempi della teoria, ci si imbatté in alcuni casi in cui le probabilità risultanti erano *negative,* e i valori negativi sono anch'essi inaccettabili. Sembrava proprio che anche la teoria delle stringhe avesse le sue gatte quantistiche da pelare.

Con determinazione ferrea, i ricercatori riuscirono a scoprire le cause di questo fenomeno. Tutto inizia da una semplice osservazione. Se una stringa è vincolata a rimanere su una superficie bidimensionale come il piano di un tavolo o il Tubuniverso - il numero delle direzioni in cui può vibrare è due: quella sinistra-destra e quella avanti-indietro. Tutti i modi di vibrazione possibili sono una combinazione di oscillazioni in queste due direzioni. Se lasciamo che la stringa si muova liberamente nello spazio, il numero di direzioni indipendenti in cui può vibrare sale a tre, perché si aggiunge quella su-giú. Anche se è difficile da immaginare, il discorso può continuare ancora: in un universo con piú dimensioni spaziali ci sono piú direzioni in cui una stringa può vibrare.

Sottolineiamo questo fatto per un motivo preciso: ci si è accorti che i calcoli problematici (quelli con risultati negativi) dipendevano molto dal numero di direzioni di vibrazione delle stringhe. Le probabilità negative nascevano da uno scollamento tra le richieste della teoria e gli impliciti vincoli posti dalla realtà: infatti, se le stringhe avessero potuto oscillare in *nove* direzioni indipendenti, tutte le probabilità negative si sarebbero cancellate. Bene, è un risultato teorico straordinario, ma come la mettiamo col fatto che la teoria delle stringhe ha la pretesa di descrivere il mondo intero e che il mondo di direzioni spaziali ne ha solo tre?

Ma è proprio cosí? Con il senno di poi, oggi sappiamo che la teoria di Kaluza-Klein ci offre una scappatoia. Poiché le stringhe sono cosí piccole, possono tranquillamente vibrare in dimensioni extra, arrotolate in qualche modo. Quindi la richiesta di nove dimensioni fatta dalla teoria può essere soddisfatta anche nel nostro universo: basta ammettere, seguendo Kaluza e Klein, che esistano sei dimensioni spaziali compattificate, in aggiunta alle tre ordinarie. In questo modo la teoria delle stringhe, che sembrava in pericolo di cadere nel mucchio delle teorie dimenticate, è salva. Ciò che è piú importante, invece di postulare l'esistenza delle dimensioni extra, come avevano fatto Kaluza, Klein e i loro seguaci, la teoria delle stringhe *richiede* che questo accada. Perché tutto abbia un senso, l'universo deve avere nove dimensioni spaziali e una temporale, per un totale di dieci. L'idea originale di Kaluza del 1919 trova cosí la sua applicazione piú importante e convincente.

7. Problemi e domande.

Quanto abbiamo appena visto fa sorgere un certo numero di domande. Prima di tutto, perché la teoria richiede proprio nove dimensioni per risolvere i suoi problemi con i valori negativi? Questa è probabilmente la domanda piú difficile a cui rispondere senza fare appello alla matematica. Il calcolo alla base di questo particolare risultato non è nulla di speciale, ma nessuno è in grado di dare una spiegazione intuitiva e non tecnica del perché il numero che salta fuori è proprio nove. Il grande fisico Ernest Rutherford disse una volta che se non si è in grado di spiegare il risultato di un calcolo in termini piú semplici, allora non lo si è capito. Ciò non vuol dire che il risultato sia sbagliato, ma solo che non se ne capiscono le origini, il significato e le conseguenze. Forse questo è vero riguardo al numero di dimensioni richieste dalle teoria delle stringhe. (Apro qui un'ampia parentesi sulla seconda rivoluzione delle superstringhe, di cui parleremo nel capitolo XII. I calcoli che portano al fatidico numero nove sono in realtà *approssimati.* Negli anni novanta Witten, basandosi su lavori precedenti suoi e di Michael Duff. della Texas A&M University, e di Chris Hull e Paul Townsend di Cambridge, mostrò in modo convincente che questo calcolo approssimato in realtà *tralascia* una dimensione: si scoprì cosí, tra lo stupore di tutti, che la teoria delle stringhe richiede *dieci* dimensioni spaziali, per un totale di *undici* dimensioni dell'universo se si include quella temporale. Fino al capitolo XII faremo finta di non saperlo, anche perché questo fatto non ha molta rilevanza per quel che diremo).

Seconda domanda: se le equazioni della teoria delle stringhe (piú precisamente, le equazioni approssimate che diamo per buone fino al capitolo XII) mostrano che l'universo ha nove dimensioni spaziali, perché quelle visibili ed estese sono tre e le altre sei sono microscopiche e compattificate? Perché non sono tutte estese, o tutte arrotolate, o qualche altra combinazione ancora? Nessuno oggi sa rispondere a questa domanda. Se la teoria delle stringhe è corretta, ci aspettiamo di arrivare prima o poi a una soluzione del mistero, ma per adesso le nostre conoscenze non sono abbastanza raffinate. Certo, ci sono stati coraggiosi tentativi di spiegazione. Ad esempio, da un punto di vista cosmologico possiamo immaginare che tutte le dimensioni siano nate compattificate e che dopo il big bang tre di quelle spaziali e la temporale si siano «srotolate» fino a raggiungere la loro estensione attuale, mentre le altre sei sono rimaste microscopiche. Altri tentativi di spiegazione verranno visti nel capitolo XIV, ma è bene dire che si tratta di abbozzi in corso d'opera. Nel libro, d'ora in poi, daremo per scontato che tre dimensioni spaziali sono estese e che le altre sono compattificate, in accordo con quanto osserviamo sperimentalmente. Uno degli obiettivi primari delle ricerche in atto è scoprire come questo fatto

discenda dalla teoria.

Terza domanda: visto che c'è bisogno di dimensioni spaziali aggiuntive, è possibile che la stessa cosa accada alla dimensione *temporale?* Se riflettiamo un attimo ci accorgiamo di quanto sia bizzarra questa possibilità. Tutti abbiamo una concezione intuitiva, viscerale dell'esistenza di piú dimensioni spaziali, perché viviamo in un mondo che ne ha, appunto, piú di una (tre, per la precisione). Ma cosa significa l'esistenza di piú « tempi »? Forse potrebbe esistere una dimensione temporale che si comporta come quella di cui facciamo esperienza e altre aggiuntive con proprietà misteriose.

Pensare a una dimensione temporale arrotolata e invisibile rende le cose ancora piú strane. Ad esempio, una formica microscopica che si muova lungo una dimensione spaziale extra di forma circolare, ritornerà sempre nella stessa posizione, man mano che compie i suoi giri. Non c'è mistero in questo, perché tutti sappiamo di essere in grado di tornare a nostro piacimento in un medesimo punto dello spazio. Ma se la dimensione extra fosse temporale, alla fine del giro la formichina si troverebbe in un *istante di tempo precedente.* Questo è molto al di là della nostra immaginazione. Il tempo, per come lo concepiamo, può essere percorso solo in una direzione, in modo inevitabile, e non è possibile ritornare a un istante appena trascorso. Certo, il tempo compattificato potrebbe avere proprietà assai diverse da quelle del familiare tempo esteso, nato con l'universo e arrivato in modo ininterrotto fino al presente. In contrasto con le dimensioni spaziali, però, una dimensione temporale extra richiederebbe una ristrutturazione radicale della nostra intuizione. Qualche teorico si è messo ad esplorare la possibilità dell'esistenza di una o piú dimensioni temporali extra all'interno della teoria delle stringhe, ma senza particolari risultati. Qui non ci discosteremo dalla teoria «consueta», in cui le dimensioni compattificate sono unicamente di tipo spaziale; ma l'affascinante possibilità che esistano nuove dimensioni temporali potrebbe riemergere in futuro.

8. Le conseguenze fisiche delle dimensioni extra.

Anni e anni di ricerche, a cominciare dall'articolo originario di Kaluza, hanno mostrato che le dimensioni extra, anche se sono troppo piccole per poter essere viste direttamente con i nostri strumenti (e infatti non le abbiamo mai viste), hanno tuttavia alcuni importanti effetti *indiretti* di cui possiamo renderci conto. Nella teoria delle stringhe questa connessione tra le proprietà microscopiche dello spazio e i fenomeni rilevabili sperimentalmente è molto evidente.

Come ricorderete, le masse e le cariche delle particelle sono determinate dai modi di vibrazione delle stringhe. Se immaginate una stringa come un piccolo anello che si contorce e oscilla, vi rendete subito conto che la forma dello spazio che la circonda è in grado di influenzare i suoi modi di vibrazione. Pensate per esempio alle onde. In mare aperto, treni d'onda isolati sono relativamente liberi di formarsi e spostarsi in vari modi. Questo è piú o meno quanto accade alle stringhe nelle dimensioni estese, in cui sono libere di vibrare in ogni direzione e in molti modi, come abbiamo visto nel capitolo VI. Ma se un'onda si infila in una regione di spazio piú piccola (come un fiordo) la sua forma e il suo moto saranno influenzati da fattori come la posizione delle rocce, la profondità del fondo e cosí via. Altro esempio: pensiamo a un organo a canne. Il suono che produce è una diretta conseguenza delle frequenze risonanti di vibrazione delle onde d'aria all'interno delle canne, che sono a loro volta determinate in modo molto preciso dalla forma dello spazio, cioè dal modo in cui l'aria è incanalata. Le dimensioni extra hanno un effetto analogo sui modi di vibrazione possibili delle stringhe. Poiché queste oscillano lungo tutte le dimensioni spaziali, il modo esatto in cui quelle extra sono nascoste e arrotolate pone notevoli limiti ai tipi di vibrazioni possibili. E i modi di vibrazione, che ora sappiamo essere determinati in gran parte dalla geometria extradimensionale, danno origine alle particelle osservabili nelle dimensioni ordinarie. Questo significa che la *geometria delle dimensioni extra determina caratteristiche osservabili come le masse e le cariche delle particelle elementari, che misuriamo nelle dimensioni ordinarie.*

E' un punto talmente importante che voglio ripeterlo, con sentimento. Secondo la teoria delle stringhe l'universo è costituito da stringhe microscopiche, i cui modi di vibrazione sono all'origine delle masse e delle cariche delle particelle elementari. La teoria delle stringhe necessita dell'esistenza di dimensioni spaziali extra che sono arrotolate in modo tale da risultare invisibili alle nostre osservazioni. Ma le stringhe sono abbastanza piccole da accorgersene: nelle loro oscillazioni, esse sono influenzate in modo notevole dalla forma geometrica delle dimensioni extra. Poiché i modi di vibrazione delle stringhe ci appaiono come le masse e le cariche delle particelle elementari, concludiamo che questi parametri fondamentali del nostro universo sono determinati, in larga parte, dalla forma e dall'estensione delle dimensioni compattificate.

Questa affermazione è una delle piú profonde di tutta la teoria delle stringhe.

Poiché la forma delle dimensioni nascoste gioca un ruolo cosí importante nello scegliere le proprietà di base dell'universo, ci mettiamo ora con rinnovato vigore a scoprire come sono fatte davvero.

9. Come sono fatte le dimensioni extra?

Non possono essere scelte a piacere, questo è certo: le equazioni della teoria pongono stretti limiti alla forma che è consentito loro assumere. Nel 1984 Philip Candelas, della University of Texas a Austin, Gary Horowitz e Andrew Strominger, della University of California a Santa Barbara, ed Edward Witten mostrarono che una particolare classe di spazi a sei dimensioni soddisfaceva a tutti i vincoli della teoria. Si trattava degli *spazi di Calabi-Yau,* cosí battezzati in onore dei matematici Eugenio Calabi, della University of Pennsylvania, e Shing-Tung Yau, di Harvard, autori di ricerche fondamentali in contesti collegati a questo, anteriori alla formulazione della teoria delle stringhe. Anche se il formalismo matematico necessario a descrivere uno spazio di Calabi-Yau è assai complesso, possiamo farci un'idea del loro aspetto con un disegno.

[8] Per gli esperti: una varietà di Calabi-Yau è una varietà complessa di Káhler con prima classe di Chern nulla. Nel 1957 Calabi congetturò che tutte queste varietà ammettono una metrica la cui curvatura di Ricci è nulla, e nel 1977 Yau lo dimostrò.

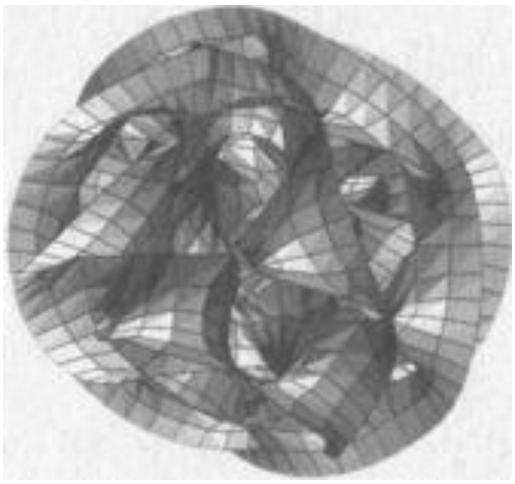

Figura 8.9.

Esempio di uno spazio di Calabi-Yau. (Per gentile concessione di Andrew Hanson dell'Indiana University. Il disegno è stato realizzato con il programma *Mathematica 3-D).*

Nella figura 8.9 ne mostriamo un esempio. Ricordatevi che stiamo cercando di visualizzare uno spazio a sei dimensioni su un foglio di carta che ne ha solo due, il che porta a evidenti distorsioni. Comunque sia, questa immagine dà un'idea approssimata dell'aspetto di uno spazio di CalabiYau.[9] Di nuovo per gli esperti: piú precisamente si tratta di una sezione reale tridimensionale della ipersuperficie quantica nello spazio proiettivo complesso di dimensione quattro.

La figura 8.9 non è che uno dei moltissimi spazi precisi (decine di migliaia) che sono ammissibili per la teoria delle stringhe. Anche se un club che conta decine di migliaia di membri non sembra poi cosí esclusivo, ricordiamoci che il numero di spazi potenziali candidati, cioè tutti quelli matematicamente possibili, è infinito; sotto questo aspetto, gli spazi di CalabiYau sono davvero una rarità.

Per tirare le fila di questo capitolo, ora dobbiamo rimpiazzare tutte le sferette della figura 8.7 - che rappresentavano solo due dimensioni extra -con tanti piccoli spazi di Calabi-Yau. Dunque, secondo la teoria delle stringhe in ogni punto dello spazio visibile esistono sei dimensioni inaspettate, strettamente avvolte fino a formare un complicato oggetto geometrico, come è mostrato nella figura 8.10. Queste nuove dimensioni sono parte integrale e omnipervasiva

della struttura dello spazio: esistono ovunque. Ad esempio, quando facciamo compiere un ampio gesto circolare a una mano, non ci stiamo movendo solo lungo le tre dimensioni estese e familiari, ma anche all'interno di quelle invisibili. Naturalmente, visto che sono microscopiche, la mano che si sposta le circumnaviga un numero enorme di volte, tornando ogni volta al punto di partenza (pensate alla formichina sul tubo di gomma). La loro piccolezza fa sì che non ci sia spazio per un oggetto grande come una mano: e cosí alla fine del movimento non ci siamo affatto resi conto di aver compiuto un viaggio anche attraverso le dimensioni extra, arrotolate in uno spazio di Calabi-Yau.

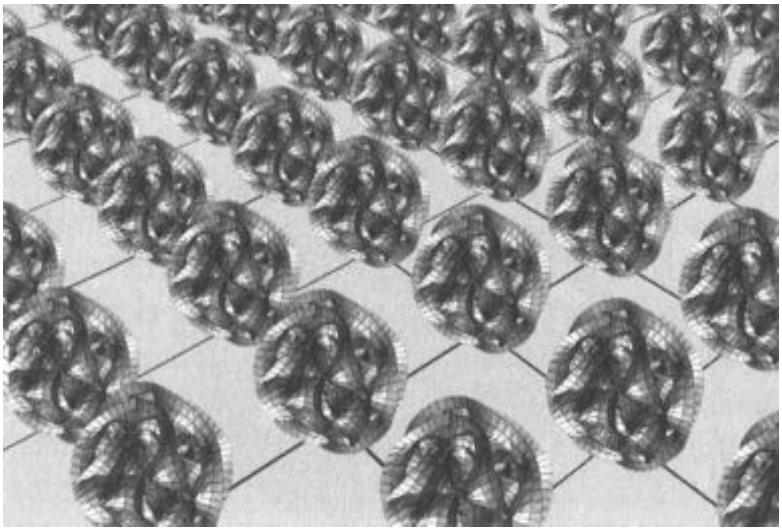

Figura 8. 10.
Secondo la teoria delle stringhe, l'universo ha delle dimensioni extra arrotolate in forma di spazi di Calabi-Yau.

Questo è davvero un aspetto sorprendente della teoria delle stringhe. Ma chi ha una mente pratica vorrà senz'altro riportare il discorso su temi più essenziali e concreti. Adesso che sappiamo qualcosa di piú sulla forma precisa delle dimensioni extra, quali sono le proprietà del mondo fisico che dovrebbero essere originate dalle stringhe che ci vibrano dentro, e come si accordano questi dati teorici con quelli sperimentali? Questa è una domanda da un milione di dollari.

Capitolo nono
Tracce fresche: le prove sperimentali

Chi si occupa di teoria delle stringhe farebbe salti di gioia se potesse mostrare orgogliosamente al mondo una lista di previsioni dettagliate e sperimentalmente verificabili. Certamente, non c'è altro modo di stabilire se una teoria è una descrizione accurata del mondo se non quello di verificare le sue previsioni. E non importa quanto la teoria delle stringhe sia convincente: se non fosse vera non sarebbe piú utile di un raffinato gioco di ruolo.

A Edward Witten piace dire che la teoria ha già fatto una previsione macroscopica e sperimentalmente confermata: « La teoria delle stringhe ha il notevole potere di *prevedere l'esistenza della* gravità »[1] Edward Witten, *Reflections on the fate of spacetime,* in «Physics Today», aprile 1996, p. 24.. Con questo Witten intende dire che sia Newton sia Einstein sono arrivati alle loro rispettive teorie partendo dal fatto che le osservazioni mostravano l'esistenza della gravità, il che necessitava di una spiegazione; se invece, per assurdo, un fisico completamente ignaro dell'esistenza di questa forza si mettesse a studiare la teoria delle stringhe, sarebbe inevitabilmente condotto a crederci. Grazie al suo gravitone privo di massa e con spin 2, la teoria delle stringhe incorpora la gravità nel seno del suo nucleo teorico. Come dice ancora Witten: «Il fatto che la gravità sia una conseguenza della teoria delle stringhe è uno dei piú grandi risultati teorici mai raggiunti ».[2] Conversazione con Edward Witten, 11 maggio 1998.

Anche se riconosce che questa «predizione» è in realtà (nelle sue parole) una «postdizione», perché una descrizione teorica della gravità esisteva già prima delle stringhe, Witten sottolinea che questo è solo un accidente storico. Magari, in altre civiltà evolute dell'universo gli scienziati locali hanno fatto l'opposto, cioè hanno scoperto prima la teoria delle stringhe e solo in seguito hanno trovato la gravità tra le sue meravigliose conseguenze.

Poiché dobbiamo limitarci alla storia della scienza terrestre, non pochi trovano questa «postdizione » poco convincente come conferma sperimentale della teoria. Molti sarebbero piú tranquilli se si trovasse una di queste cose: una «vera» previsione verificabile sperimentalmente, o una previsione ex post di qualche proprietà del mondo fisico (come la massa dell'elettrone o l'esistenza delle tre famiglie di particelle) per cui manca ancora una spiegazione convincente. In questo capitolo vedremo a che punto si è arrivati in entrambe le direzioni.

Paradossalmente ci accorgeremo che, anche se la teoria delle stringhe ha le potenzialità per fare piú previsioni di tutte le altre - e di spiegare le proprietà piú fondamentali della natura, - nessuno è ancora stato capace di fare una sola previsione che avesse la precisione necessaria per confrontarsi con i dati sperimentali. Come un bambino che riceve il giocattolo dei suoi sogni la mattina di Natale, ma che non riesce a farlo funzionare perché mancano poche pagine al manuale d'istruzioni, cosí i fisici di oggi hanno per le mani quello che potrebbe essere il Sacro Graal della scienza, ma non possono sfruttarne i poteri fino a quando non riusciranno a scrivere il manuale d'uso. Comunque, come vedremo in questo capitolo, con un po' di fortuna un fatto fondamentale della teoria potrebbe essere confermato sperimentalmente nei prossimi dieci anni. E con un bel po' di fortuna in piú, le impronte che rivelano il passaggio della teoria potrebbero essere trovate in ogni momento.

1. Fuoco di fila.

La teoria delle stringhe è corretta? Non lo sappiamo. Se anche voi pensate che le leggi della natura non dovrebbero essere scisse in leggi per le grandi dimensioni e altre leggi per le piccole, e se pensate che non dovremmo darci pace fino a

che non troveremo una teoria applicabile a ogni scala, sappiate che attualmente non avete alternative alle stringhe. Certo, potreste ribattere che ciò è colpa della scarsa immaginazione degli scienziati e non delle caratteristiche intrinseche della teoria. Forse. Potreste anche pensare che i fisici si stanno comportando come chi cerca le chiavi perdute solo sotto la luce del lampione, e cioè sono innamorati delle stringhe perché i casi della storia della scienza hanno acceso un raggio di luce proprio in quella direzione. Può essere. E se siete dei veri conservatori, o vi piace fare l'avvocato del diavolo, potreste concludere dicendo che è una vera perdita di tempo occuparsi di una teoria che postula nuove caratteristiche della natura visibili solo a grandezze milioni di miliardi di volte piú piccole di quelle che possiamo raggiungere sperimentalmente.

Se fossimo ancora a metà degli anni ottanta, gli scettici sarebbero in compagnia dei piú eminenti fisici del nostro tempo. Ad esempio, nel 1986 il Nobel Sheldon Glashow, insieme al collega di Harvard Paul Ginsparg, cosí denigrava pubblicamente la teoria delle stringhe:

In luogo del tradizionale confronto tra teoria ed esperimento, gli adepti della teoria delle superstringhe inseguono l'armonia interiore, un luogo dove la verità è definita dall'eleganza, dall'unicità e dalla bellezza. L'esistenza della teoria dipende da coincidenze magiche, cancellazioni miracolose e relazioni tra aree della matematica apparentemente non correlate (e forse non ancora inventate). Sono queste proprietà il motivo per accettare la realtà delle superstringhe? Forse la matematica e l'estetica hanno soppiantato e trasceso il mero esperimento?[3] Sheldon Glashow e Paul Ginsparg, *Desperately seeking superstlings?,* in «Physics Today», maggio 1986, P. 7.

E cosí continuava in un altro momento:

La teoria delle superstringhe è cosí ambiziosa che può essere o tutta giusta o tutta sbagliata. L'unico problema è che la matematica che sta alla sua base è cosí nuova e complicata che non lo sapremo per decenni e decenni. [4] Sheldon Glashow, in A. Zichichi (a cura di), *The Supenuorld I,* Plenum, NewYork 1990, p. 250.

Arrivò persino a chiedersi se chi si occupava di superstringhe dovesse «venir pagato dai dipartimenti di fisica per corrompere la mente degli studenti impressionabili », perché secondo lui questa teoria stava minando le fondamenta della scienza, come la teologia nel Medioevo.[5] Id . , I*nteractions,* Warner Books, New York 1988, P. 335.

Richard Feynman, poco prima di morire, disse chiaramente di non credere che la teoria delle stringhe fosse l'unica cura dei problemi - in particolare degli odiosi infiniti - che affliggevano l'unificazione di meccanica quantistica e relatività generale:

La mia sensazione - e potrei sbagliarmi - è che ci siano molti modi di fare la pelle a un gatto. Non penso che ci sia una sola strada per evitare gli infiniti. Il fatto che una teoria ci riesca non è per me una ragione sufficiente per credere che sia unica.[6] Richard Feynman, in P. Davies e J. Brown (a cura di), *Superstrings. A Theory of Everything?,* Cambridge University Press, Cambridge 1988.

Anche Howard Georgi, eminente collega di Glashow alla Harvard University, era assai critico alla fine degli anni ottanta:

Se ci lasciamo ammaliare dalle sirene che cantano dell'unificazione «ultima», a distanze cosí piccole che i nostri amici sperimentali non sono minimamente in grado di aiutarci, allora siamo nei guai, perché perdiamo quel processo fondamentale di eliminazione delle idee irrilevanti che distingue la fisica da tante altre attività umane meno interessanti.[7] Howard Georgi, in P. Davies (a cura di), *The New Physics,* Cambridge University Press, Cambridge 1989, P. 446 [trad. it. *La nuova fisica,* Bollati Boringhieri, Torino 1992, P. 4771.

Cosí come sempre accade sulle questioni importanti, per ciascuno di questi scettici c'è un sostenitore altrettanto determinato. Per Witten, apprendere che la teoria delle stringhe riunisce in sé gravità e meccanica quantistica fu «il piú grande piacere intellettuale»[8] Conversazione con Edward Witten, 4 marzo 1998. della sua vita.

Cumrun Vafa, uno dei piú eminenti teorici della Harvard University, ha detto che per lui «la teoria delle stringhe si sta sicuramente rivelando la teoria dell'universo piú profonda che abbiamo mai avuto ».[9] Conversazione con Cumrun Vafa, 12 gennaio 1998.

Per il Nobel Murray Gell-Mann è «una cosa fantastica», e una versione della teoria delle stringhe un giorno sarà senz'altro la teoria dell'universo.[10] Murray Gell-Mann, citato in Robert P. Crease e Charles C. Mann, *The Second Creation,* Rutgers University Press, New Brunswick (N. J.) 1996, P. 414.

Come vedete, il dibattito è alimentato in parte dalla fisica in sé e in parte dalle posizioni filosofiche sui modi di fare fisica. I «tradizionalisti» vogliono che il lavoro teorico sia strettamente correlato alle osservazioni sperimentali, come è

stato fatto in modo assai efficace negli ultimi secoli. Ma altri pensano che siamo pronti per affrontare questioni che l'attuale tecnologia non ci consente di testare direttamente.

Posizioni filosofiche a parte, negli ultimi anni molte delle critiche si sono stemperate. Per Glashow questo è dovuto a due fattori. In primo luogo, a metà degli anni ottanta

chi si occupava di stringhe andava in giro a proclamare in modo chiassoso che avrebbe risposto in poco tempo a tutte le domande della fisica. Oggi sono piú prudenti nelle loro affermazioni, e quindi le mie critiche di allora sono in gran parte cadute.[11]Conversazione con Sheldon Glashow, 28 dicembre 1997.

In secondo luogo:

Noi non-stringhisti non abbiamo fatto alcun progresso negli ultimi dieci anni. Quindi l'idea che la teoria delle stringhe sia l'unica via d'uscita è assai allettante. Ci sono problemi che le convenzionali teorie quantistiche di campo non possono risolvere, questo è chiaro. Potrebbero essere risolti da qualcos'altro, e l'unico «qualcos'altro» che io conosco è la teoria delle stringhe`.[12]'" *Ibid.*

Anche Georgi è ritornato sulle sue affermazioni degli anni ottanta:

Molte volte, nei suoi primi anni di vita, la teoria delle stringhe è stata sopravvalutata. In seguito, ho trovato che alcune sue idee portano a modi interessanti di vedere le cose che mi sono stati utili nel mio lavoro. Oggi sono molto piú felice di vedere ricercatori che si applicano alla teoria delle stringhe, perché sento che si può ricavare qualcosa di utile.[13] Conversazione con Howard Georgi, 28 dicembre 1997. Nel corso del nostro colloquio, Georgi mi disse anche che la sua riluttanza nei confronti delle superstringhe era dovuta soprattutto alla confutazione sperimentale del decadimento del protone, previsto nella proposta di teoria unificata fatta da lui e da Glashow (vedi capitolo VII). Acutamente, egli osservò che la sua proposta di unificazione implicava energie assai piú elevate di quelle pensate sino ad allora, e che quando le sue previsioni si dimostrarono errate - nelle sue parole, quando la natura gli «diede uno schiaffone» - il suo atteggiamento verso le alte energie cambiò drasticamente. Quando gli chiesi se una conferma sperimentale della sua teoria gli avrebbe dato la forza per dare l'attacco alla lunghezza di Planck, mi rispose: « Sí, probabilmente sí ».

David Gross, un teorico stimato sia nel campo della fisica tradizionale sia in quello delle stringhe, riassume cosí la questione:

Un tempo, quando si scalava la montagna della natura, gli sperimentali erano i capicordata e noi pigri teorici li seguivamo a distanza. Ogni tanto i battistrada ci tiravano un sasso sperimentale che ci finiva sulla testa. Alla fine capivamo cosa stava succedendo e seguivamo il sentiero tracciato per noi. Una volta raggiunti i nostri amici in cima, spiegavamo loro che cosa si poteva vedere e come erano arrivati lì. Questi erano i bei vecchi tempi, dove tutto era facile (almeno per i teorici). Tutti vorremmo che tornassero. Ma oggi potrebbe toccare a noi teorici fare da guida. Questa è un'impresa molto piú solitaria.[14] David Gross, *Superstrings and unification,* in R. Kotthaus e J. Kúhn (a cura di), *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics,* Springer-Verlag, Berlin 1988, P. 329.

I teorici delle stringhe non hanno nessuna voglia di fare scalate in solitaria; preferirebbero dividere onori e oneri con gli sperimentali. E' per un puro accidente tecnologico - una asincronia storica - che i ramponi e le corde teoriche per la scalata siano già in progettazione e che quelli sperimentali non esistano ancora. Ma questo non significa un divorzio totale della teoria delle stringhe dall'esperimento. Anzi, i teorici hanno buone speranze di poter «tirare giú un sasso *teorico»* dalla cima ultra-energetica della montagna agli sperimentali che sono giù al campo base.

Questo è lo scopo principale della ricerca odierna. Nessun masso è ancora stato fatto rotolare dalla vetta, ma come vedremo, qualche ciottolo interessante è già scivolato giú.

2. Verso gli esperimenti.

A meno che non intervenga una qualche rivoluzione tecnologica, non saremo mai capaci di vedere direttamente una stringa. Un acceleratore lungo qualche chilometro può arrivare a sondare distanze di un miliardesimo di miliardesimo di metro. Scendere ancora di scala richiede energie piú elevate e quindi macchine piú grandi capaci di concentrare tali energie su una singola particella. Poiché la lunghezza di Planck è 17 ordini di grandezza piú piccola dei nostri limiti attuali, con la stessa tecnologia avremmo bisogno di un acceleratore grande quanto la nostra galassia per vedere le singole stringhe. Anzi, come ha mostrato l'israeliano Shmuel Nussinov, questa semplice proporzione è probabilmente troppo

ottimistica: calcoli piú precisi mostrano che l'acceleratore in questione dovrebbe essere grande come *l'universo.* (L'energia richiesta per arrivare alla lunghezza di Planck non è niente di speciale: circa mille kilowattora, quanto serve per tenere acceso un condizionatore per cento ore. Ciò che rende il compito impossibile è il dover concentrare tutta questa energia su una sola particella, cioè su una sola stringa). Visto che il Congresso americano ha cancellato i fondi per il famoso ssc (Superconducting SuperCollider), con « solo » 86 chilometri di circonferenza, non mi scalderei troppo nell'attesa di un acceleratore adeguato alla scala di Planck. Se vogliamo verificare la teoria delle stringhe, dobbiamo usare qualche metodo indiretto, cioè dobbiamo trovare una conseguenza fisica della teoria che possa essere osservata a scale assai piú grandi rispetto alla dimensione di una stringa.[15] Detto questo, è bene tenere a mente che c'è chi ha avanzato l'azzardata ipotesi (si veda la nota 8 del capitolo VI) che le stringhe siano *molto* piú grandi di quanto si pensi; dunque tra non moltissimo potrebbero essere osservate direttamente con acceleratori piú potenti.

Il primo passo in questa direzione è contenuto nel fondamentale articolo di Candelas, Horowitz, Strominger e Witten. Non solo questi ricercatori hanno dimostrato che le dimensioni extra della teoria sono compattificate in uno spazio di Calabi-Yau, ma hanno anche esaminato alcune possibili conseguenze di questo fatto sui modi di vibrazione. Uno dei loro risultati esemplifica le incredibili soluzioni a certi problemi annosi che saltano fuori dalla teoria delle stringhe.

Ricorderete che le particelle elementari fin qui trovate sono divise in tre famiglie con la stessa struttura e con masse via via crescenti. Una domanda a cui prima della teoria delle stringhe non si poteva rispondere è: perché la divisione in famiglie, e perché proprio tre? Ecco la nuova proposta. Un tipico spazio di Calabi-Yau contiene *buchi* analoghi a quelli che si trovano al centro di una ciambella, o di una «multiciambella», come nella figura 9.1. Nel contesto a piú dimensioni degli spazi di Calabi-Yau, in realtà, anche i buchi possono avere molte dimensioni, ma la figura 9.1 illustra l'idea di fondo. Candelas, Horowitz, Strominger e Witten hanno studiato in dettaglio gli effetti di questi buchi sui modi di vibrazione possibili, ed ecco quanto hanno scoperto.

A ogni buco nello spazio di Calabi-Yau è associata una famiglia di vibrazioni di minima energia. Poiché le famiglie di particelle elementari dovrebbero corrispondere proprio a questi modi di vibrazione, l'esistenza di un certo numero di buchi mostrerebbe che le particelle si suddividono in tante famiglie quanti sono i buchi: se lo spazio di CalabiYau di compattificazione ha tre buchi, anche le famiglie sono tre.[16] Per i lettori esperti, l'enunciato matematicamente piú preciso è questo: il numero delle famiglie è uguale a metà del valore assoluto della caratteristica di Eulero dello spazio di CalabiYau. Il numero di Eulero è dato dalla somma a segni alterni delle dimensioni dei gruppi di omologia della varietà - queste ultime corrispondono a ciò che nel testo abbiamo chiamato «numero di buchi multidimensionali». Di conseguenza si hanno 3 famiglie nel caso di spazi di Calabi-Yau il cui numero di Eulero è pari a ±6.

Quindi la teoria delle stringhe spiega l'organizzazione delle famiglie di particelle osservata sperimentalmente, che non è piú solo un dato di fatto casuale o di origine divina, ma un semplice riflesso del numero di buchi nella forma geometrica in cui sono arrotolate le dimensioni extra! Questo è il genere di risultati che fa emozionare i fisici.

Potreste dunque pensare che il numero di buchi nelle dimensioni compattificate alla scala di Planck - una delle vette piú ambite - abbia fatto rotolare un sasso giú fino agli sperimentali e al campo delle energie testabili.

Sfortunatamente, le decine di migliaia di spazi di Calabi-Yau noti hanno un numero di buchi vario e disparato: c'è chi ne ha 3, ma altri ne hanno 4, 5, 25 o addirittura 480. *Il problema è che nessuno sa come dedurre dalle equazioni della teoria delle stringhe quale degli spazi di CalabiYau formi le dimensioni extra.* Se trovassimo un principio che ci permettesse di selezionare lo spazio appropriato, allora potremmo davvero far rotolare un macigno al campo degli sperimentali. Se il numero di buchi dello spazio scelto fosse tre, avremmo una notevole predizione ex *post* di una caratteristica del mondo microscopico altrimenti del tutto oscura. Ma trovare il modo di scegliere tra gli spazi è un problema ancora insoluto. Comunque - e questo è il punto fondamentale - vediamo che la teoria delle stringhe ha le potenzialità per risolvere questo rompicapo, il che è un notevole progresso in sé.

Figura 9.1.

Una ciambella, o toro, e i suoi compagni a piú buchi.

Il numero delle famiglie non è che una delle conseguenze sperimentali che si possono dedurre dalla forma delle dimensioni compattificate. La loro influenza sui modi di vibrazione si riflette su molte proprietà delle particelle materiali e mediatrici delle forze. Ad esempio, alcuni lavori successivi di Strominger e Witten hanno mostrato che le masse dipendono - tenetevi forte, le cose si fanno un po' complicate - dal modo in cui i bordi *(boundaries)* dei buchi multidimensionali dello spazio di Calabi-Yau si intersecano e si sovrappongono. E' difficile da visualizzare, ma l'idea è questa: mentre le stringhe vibrano nelle dimensioni extra, la disposizione precisa dei vari buchi e il modo in cui lo spazio di Calabi-Yau. si estende attorno a loro hanno delle conseguenze precise sui modi di vibrazione possibili. I dettagli sono complicati ma non essenziali qui; ci basta sottolineare che ancora una volta, come per il numero delle famiglie, la teoria delle stringhe ci fornisce un modo per rispondere a domande su cui le vecchie teorie non sapevano dire nulla, come perché l'elettrone ha proprio quella massa. Di nuovo, purtroppo, per completare l'opera bisognerebbe sapere quale spazio di Calabi-Yau. prendere per le dimensioni extra.

Quanto abbiamo appena visto ci dà un'idea di come la teoria delle stringhe potrebbe un giorno spiegare tutte le proprietà delle particelle materiali raccolte nella tabella 1.1 Molti sono convinti che in modi analoghi si comprenderanno anche i numeri della tabella 1.2, cioè le proprietà delle particelle mediatrici delle forze fondamentali: mentre le stringhe si torcono e vibrano vagando nelle dimensioni extra, un piccolo sottoinsieme del loro vasto repertorio ha modi di vibrazione con spin 1 o 2. Questi sono i candidati al ruolo di mediatori di forze. Indipendentemente dal tipo di spazio di CalabiYau, sappiamo già che esiste un modo di vibrazione il cui spin è 2, e lo abbiamo identificato con il gravitone. Invece, la lista precisa delle particelle a spin 1 - quante sono, l'intensità della forza che mediano, quali simmetrie di gauge rispettano - dipende in modo essenziale dalla forma geometrica delle dimensioni compattificate. Anche in questo caso vediamo che la teoria delle stringhe ha la capacità di spiegare i dati sperimentali raccolti, ma senza sapere con esattezza la forma dello spazio di Calabi-Yau, non possiamo fornire predizioni o giustificazioni definitive (oltre a quella già ricordata riguardante il gravitone).

Perché non si riesce a scoprire quale sia lo spazio «giusto»? Molti danno la colpa all'inadeguatezza degli strumenti teorici attualmente usati. Come vedremo meglio nel capitolo XII, la struttura matematica della teoria delle stringhe è cosí complicata che finora si è riusciti a completare solo calcoli approssimati grazie ai cosiddetti *metodi perturbativi.* All'interno di questa approssimazione, tutti i possibili spazi di Calabi-Yau sembrano essere sullo stesso piano: le equazioni non ne selezionano nessuno. E poiché le conseguenze fisiche della teoria dipendono direttamente da questa scelta, non possiamo trarre alcuna conclusione definitiva verificabile sperimentalmente. La ricerca contemporanea va nella direzione di nuovi metodi che superino quelli approssimati e ci consentano, tra le altre cose, di ritrovarci con un unico spazio di Calabi-Yau. Nel capitolo XIII vedremo che progressi si stanno compiendo in questi ambiti.

3. Troppe possibilità.

Vi potreste allora chiedere: anche se non sappiamo ancora quale sia la forma giusta delle dimensioni extra, ce n'è qualcuna, tra le molte possibili, che dà origine a proprietà fisiche in accordo a quelle osservate? In altre parole, se calcolassimo le caratteristiche fisiche delle particelle associate a tutti i possibili spazi di Calabi-Yau e le raccogliessimo in un grande catalogo, ne troveremmo qualcuna che si accorda con la realtà? E una domanda importante, ma per due motivi principali è molto difficile rispondere in modo soddisfacente.

Un punto di partenza sensato sarebbe quello di concentrarsi solo sugli spazi che danno origine a tre famiglie; questa scelta riduce sensibilmente la lista delle possibilità da esaminare, anche se ne rimangono non poche. Notate infatti che possiamo deformare in molti modi - in infiniti modi, in realtà -una ciambella a piú buchi senza aggiungere o sottrarre buchi a quanti ne aveva in partenza. Nella figura 9.2 mostriamo una possibile deformazione della figura 9.1 in basso. Allo stesso modo, a partire da uno spazio di Calabi-Yau a tre buchi possiamo ricavare un numero infinito di altri spazi opportunamente deformati. (Quando dicevamo poco fa che esistono decine di migliaia di spazi di Calabi-Yau, stavamo già raggruppando nella stessa categoria tutti quelli che possono essere deformati in questa maniera: piú di diecimila sono i tipi irriducibili l'uno nell'altro). Il problema è che le proprietà fisiche dei modi di vibrazione delle stringhe, le loro masse e le loro interazioni con le forze, sono *molto* influenzate da queste deformazioni. E anche se tutti gli scienziati del mondo si mettessero a studiare gli spazi uno a uno, non ci sarebbe modo di trovare un elenco di proprietà associate a un numero

infinito di forme.

Questo fatto ha portato i ricercatori a concentrarsi su un campione di spazi. Anche qui, però, non tutto fila liscio. Le equazioni approssimate attualmente in uso non sono in grado di calcolare interamente che tipo di fisica salti fuori da una certa forma di Calabi-Yau. Ci possono far avvicinare a capire le proprietà dei modi di vibrazione che vorremmo fossero simili a quelle delle particelle osservate, a una prima stima. Ma una conclusione precisa e definitiva - come la massa dell'elettrone o l'intensità della forza debole - richiede equazioni che sono molto al di là delle nostre possibilità attuali. Nel capitolo vi abbiamo visto che l'energia naturale per la teoria delle stringhe è quella di Planck, e che questa viene ridotta solo attraverso precisissime cancellazioni, per poter dare vita a modi di vibrazione le cui masse sono simili a quelle delle particelle note. Queste cancellazioni devono essere calcolate con grande accuratezza, perché anche un piccolo errore si riflette enormemente sulla precisione finale. Come vedremo nel capitolo XII, a metà degli anni novanta si è fatta molta strada verso il superamento delle equazioni approssimate, ma molta ne rimane.

Cosa ci resta, allora? Anche se non sappiamo come scegliere lo spazio di Calabi-Yau appropriato, e pur non avendo gli strumenti teorici per calcolare tutte le conseguenze fisiche di una particolare scelta, possiamo sempre chiederci se sia mai stato trovato uno spazio tra i molti che dà origine a un mondo piú o meno simile a quello osservato. La risposta è incoraggiante. Anche se gran parte degli spazi possibili mostra proprietà assai diverse da quelle verificate (diverse particelle elementari, diverse famiglie, diverse forze fondamentali e cosí via), qualcuno dà vita a un mondo fisico non troppo diverso da quello che vediamo in realtà. Quindi *esistono* degli spazi di Calabi-Yau che, scelti come forma delle dimensioni compattificate, portano a modi di vibrazione simili alle particelle del modello standard. E indipendentemente dalla scelta, la particella che media la forza gravitazionale viene comunque generata, incorporando cosí la gravità in una teoria di tipo quantistico.

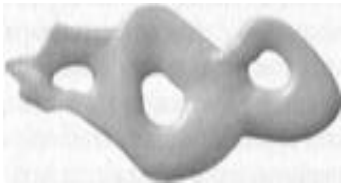

Figura 9. 2.
Una «multiciambella» può essere deformata in molti modi - uno dei quali è illustrato qui senza che cambi il suo numero di buchi.

Allo stadio attuale delle ricerche, non avremmo potuto sperare nulla di meglio. Se molti spazi di Calabi-Yau fossero in sostanziale accordo con i dati sperimentali, il legame fra la scelta dello spazio e le leggi che osserviamo sarebbe stato piú debole: molte forme potrebbero essere quelle giuste e un eventuale accordo sperimentale servirebbe a poco per decidere. Se invece nessuno degli spazi di Calabi-Yau si avvicinasse lontanamente alle proprietà fisiche osservate, allora la teoria delle stringhe non sarebbe nulla piú di un elegante quadro teorico, privo di rilevanza per il nostro universo. L'aver trovato finora pochi spazi con caratteristiche adatte, visti i nostri attuali limiti, è un risultato molto incoraggiante.

Riuscire a spiegare le proprietà delle particelle elementari materiali e mediatrici sarebbe una tra le piú grandi - se non la piú grande - impresa scientifica mai compiuta. Sarebbe comunque una spiegazione ex *post* di fenomeni già noti. Vi potreste chiedere dunque se la teoria delle stringhe è in grado di fare vere *predizioni* verificabili sperimentalmente. La risposta è affermativa.

4. Le superparticelle.

Gli ostacoli teorici che ci impediscono di fare previsioni dettagliate ci obbligano a cercare proprietà *generali,* e non specifiche, dell'universo. In questo contesto, «generale» si riferisce a caratteristiche talmente basilari da essere influenzate poco o nulla dagli aspetti della teoria attualmente al di là della nostra portata. Queste proprietà possono essere trattate con piú sicurezza, anche con una teoria incompleta. Piú avanti vedremo altri esempi, ma ora concentriamoci su una sola: la supersimmetria.

Come abbiamo visto nel capitolo VII, la teoria delle stringhe è fortemente simmetrica, non solo dal punto di vista dei piú noti principi, ma anche al massimo livello matematicamente possibile, la supersimmetria. Ciò significa che ogni modo di vibrazione di una stringa è accoppiato a un altro -il suo partner supersimmetrico - il cui spin differisce per mezza unità. Poiché la teoria prevede che ad alcuni modi di vibrazione corrispondano le particelle elementari note, prevede anche (e questa è una vera predizione) che ogni particella abbia il suo partner supersimmetrico. Siamo in grado di calcolare la carica di queste ipotetiche particelle, ma non ancora la massa. In ogni modo, teorizzarne *l'esistenza* è una caratteristica generale, una proprietà che è vera indipendentemente dagli aspetti ancora oscuri della teoria.

Nessun partner supersimmetrico delle particelle elementari note è mai stato osservato. Questo potrebbe significare che non esistono e che la teoria delle stringhe è sbagliata. Ma secondo molti ricercatori questo significa che si tratta di particelle molto pesanti, al di là delle nostre attuali capacità di osservazione. A Ginevra si sta costruendo un colossale acceleratore (l'LHC, Large Hadron Collider) e ci sono grandi speranze che sarà abbastanza potente da poter rivelare i partner supersimmetrici. L'operatività dovrebbe iniziare prima del 2010, data a partire dalla quale la supersimmetria potrebbe trovare conferma sperimentale. Come dice Schwarz, «la supersimmetria dovrebbe essere scoperta tra non molto. E quando accadrà, sarà straordinario» .[17] Conversazione con John Schwarz, 23 dicembre 1997.

Tenete comunque a mente due cose. Anche se i partner supersimmetrici fossero scoperti, ciò non sarebbe una prova definitiva a favore della teoria delle stringhe. Come abbiamo visto, anche se la supersimmetria è stata scoperta studiando le proprietà delle stringhe, è stata inserita con successo nelle teorie che prevedono particelle puntiformi, e non è dunque una caratteristica speciale della teoria delle stringhe. Se invece l'LHC non trovasse nulla, questo insuccesso non proverebbe che la teoria è falsa, perché i partner supersimmetrici potrebbero essere ancora piú pesanti, al di là del potere anche di questa nuova macchina.

Detto questo, se le nuove particelle venissero davvero trovate, si tratterebbe certamente di una forte e incoraggiante prova a favore della teoria delle stringhe.

5. Particelle con carica frazionaria.

Un altra traccia sperimentale della teoria delle stringhe ha a che fare con la carica elettrica, ed è un po' meno generale della supersimmetria ma non meno sorprendente. Le particelle elementari del modello standard hanno un assortimento molto limitato di cariche elettriche: i quark e gli antiquark hanno cariche pari a ± 1/3 e ± 2/3; le altre particelle hanno cariche pari a ± 1 oppure carica nulla. Nella teoria delle stringhe, invece, sono possibili modi di vibrazione corrispondenti a particelle con cariche assai diverse ed «esotiche», come 1/5, 1/11, 1/13 o 1/53. Questi valori inconsueti saltano fuori se le dimensioni compattificate hanno una precisa proprietà geometrica: i loro buchi sono tali che le stringhe che li circondano possono liberarsi solo se li avvolgono facendo un ben determinato numero di giri.[18] Per gli esperti, notiamo che qui ci stiamo riferendo a varietà di Calabi-Yau. con gruppo fondamentale finito e non banale, il cui ordine, in alcuni casi, determina i denominatori delle cariche frazionarie.

I dettagli non sono importanti qui, ma si dimostra che il numero di avvolgimenti necessari per districarsi determinano il denominatore della carica frazionaria.

Alcuni spazi di Calabi-Yau hanno questa proprietà e altri no, ed è per questo che la possibilità di particelle con cariche esotiche è una proprietà meno generale della supersimmetria. D'altra parte l'esistenza di partner supersimmetrici non è una prerogativa unica della teoria delle stringhe, mentre in *nessuna* delle teorie puntiformi c'è l'esigenza di postulare queste particelle con carica esotica, come mostrano decenni di ricerche - possono essere inserite a forza nella teoria, ma la cosa è del tutto innaturale. La loro eventuale presenza sarebbe una sorta di «firma sperimentale» della teoria delle stringhe.

Come per la supersimmetria, le particelle con carica esotica non sono ancora state osservate e allo stato attuale della teoria non sappiamo dire quali potrebbero essere le masse generate dagli spazi di Calabi-Yau opportuni. Un motivo per cui non le troviamo, anche qui, potrebbe essere la loro grande massa - e in realtà sembra probabile che abbiano masse dell'ordine di quella di Planck. Ma se in futuro dovessimo imbatterci in una particella esotica, sarebbe una prova molto forte a favore della teoria.

6. Qualche sguardo piú in là.

Ci sono ancora altri modi in cui potremmo trovare prove sperimentali a supporto della teoria delle stringhe. Per esempio, Witten ha notato che c'è una remota possibilità che gli astronomi possano raccogliere qualche indizio nello spazio profondo. Come abbiamo visto al capitolo VI, anche se una stringa tipica ha le dimensioni della lunghezza di Planck, l'aumento dell'energia può farla diventare molto piú grande. L'energia sviluppata nel big bang, in particolare, avrebbe potuto produrre qualche stringa di grandezza macroscopica, che a causa dell'espansione cosmica sarebbe potuta crescere a scala astronomica. Possiamo pensare che una di queste stringhe eccezionali passi un giorno nel nostro cielo, lasciando una traccia inconfondibile nei dati misurati dagli astronomi (come un piccolo spostamento nella temperatura della radiazione cosmica di fondo a microonde; si veda il capitolo XIV). Come dice Witten: «Anche se sembra poco probabile, questo per me sarebbe il modo migliore di confermare la teoria, perché nulla sarebbe cosí evidente come l'immagine di una stringa al telescopio».[19] "Conversazione con Edward Witten, 4 marzo 1998.

Piú vicino alla Terra, sono state avanzate altre possibilità di verifica sperimentale; ne farò cinque esempi. Primo, abbiamo già notato come non si sappia se il neutrino abbia o meno una massa; secondo il modello standard è privo di massa, ma questo non per motivi fondamentali. Una sfida per la teoria delle stringhe è cercare di spiegare le caratteristiche del neutrino, soprattutto visti i risultati di recenti esperimenti secondo i quali il neutrino avrebbe una seppur piccola massa. Secondo, esistono processi ipotetici proibiti dal modello standard ma forse permessi dalla teoria delle stringhe; tra questi potrebbero esserci il decadimento del protone (non preoccupatevi, sarebbe comunque lentissimo) e varie trasmutazioni dei quark, in violazione di proprietà assai ben stabilite dalla teoria quantistica di campo «puntiforme».[20] Per gli esperti: alcuni di questi processi violano la conservazione del numero leptonico e la simmetria CPT (carica-parità-tempo).

Questi processi sono molto importanti proprio perché proibiti dalla teoria tradizionale: se ne trovassimo traccia, dovremmo invocare nuove leggi, e potrebbero nascere interessanti terreni di confronto per la teoria delle stringhe. Terzo, per certe scelte dello spazio di CalabiYau esistono modi di vibrazione particolari che possono efficacemente mediare nuove forze deboli a lungo raggio. Se gli effetti di queste forze venissero scoperti, potrebbero riflettere altre proprietà della teoria delle stringhe. Quarto, come vedremo nel prossimo capitolo, ci sono molte prove del fatto che la nostra galassia e forse l'intero universo siano immersi in una nube di *materia oscura,* la cui natura deve ancora essere stabilita. La teoria delle stringhe ha un certo numero di modi di vibrazione che si candidano al ruolo; per il verdetto bisognerà attendere futuri risultati sperimentali che precisino meglio le proprietà della materia oscura.

La quinta possibilità, infine, riguarda la costante cosmologica. Ricorderete, dal capitolo III, che si tratta del termine aggiunto in un primo tempo da Einstein alle sue equazioni della relatività generale, per assicurarsi che l'universo fosse statico; la scoperta successiva dell'espansione dell'universo lo fece tornare sui propri passi. Nessuno, però, sa perché la costante cosmologica dovrebbe essere zero. La si può interpretare come un specie di energia complessiva immagazzinata nello spazio vuoto, e il suo valore dovrebbe essere teoricamente calcolabile e sperimentalmente verificabile. Ma a oggi tra teoria ed esperimento c'è un vero abisso: secondo le osservazioni dirette la costante è zero oppure molto piccola; secondo i calcoli invece le fluttuazioni quantistiche nel vuoto porterebbero a generare una costante il cui valore è 120 ordini di grandezza (10^{120}) piú grande di quello osservato. Questa è un'ottima opportunità per la teoria delle stringhe, anche se per ora nessuno ha raccolto la sfida. Se i calcoli fossero in grado di mostrare che le stringhe mitigano la costante fino a valori prossimi allo zero, sarebbe una convincente prova a favore della teoria.

7. Una valutazione.

La storia della fisica è piena di idee che in un primo tempo erano sembrate assolutamente non verificabili ma che poi, grazie a progressi imprevisti, si trovarono incluse nel regno della sperimentazione. La nozione che la materia è fatta di atomi, l'ipotesi del neutrino di Pauli e la possibilità che i cieli siano disseminati di stelle di neutroni e buchi neri sono idee che noi oggi abbracciamo senza remore, ma che all'epoca in cui furono proposte sembravano piú fantascienza che scienza.

I motivi per sostenere la verità della teoria delle stringhe sono ancora piú validi - e la teoria è stata salutata come l'idea piú importante in fisica teorica dopo la meccanica quantistica. E' un accostamento calzante, perché la storia di quest'ultima ci insegna che le rivoluzioni possono maturare anche in molti decenni. E rispetto ai ricercatori attuali, i

pionieri della meccanica quantistica avevano il vantaggio di poter confrontare la teoria, anche nelle sue formulazioni parziali, direttamente con i risultati sperimentali. Anche cosí ci vollero circa trent'anni per arrivare a una struttura logica coerente e altri venti per farvi entrare pienamente la relatività ristretta. Oggi stiamo cercando di incorporarvi la relatività generale, un compito assai piú arduo e dove è piú difficile avere il conforto dei dati sperimentali. La luce del mondo naturale non guida i nostri passi come faceva ai tempi eroici della nascita della meccanica quantistica.

Quindi è possibile che una o piú generazioni di fisici dedichino la vita alla teoria delle stringhe senza neanche un'ombra di conforto sperimentale. I non pochi ricercatori che oggi lavorano alla teoria conoscono il rischio che corrono: che una vita di sforzi potrebbe non avere una conclusione positiva. Certo, gli avanzamenti teorici continueranno, ma saranno sufficienti per superare tutti gli ostacoli ed arrivare a previsioni definitive e verificabili? E i test indiretti che abbiamo descritto prima porteranno a far intravedere qualche traccia? Sono domande fondamentali per chi fa ricerca, ma anche domande senza risposta: solo il tempo lo dirà. L'elegante semplicità della teoria delle stringhe, il modo in cui risolve il conflitto tra relatività generale e meccanica quantistica, la sua capacità di unificare tutti gli ingredienti della natura e il suo potenziale predittivo virtualmente illimitato, forniscono l'ispirazione necessaria per continuare a lavorare.

Queste nobili considerazioni sono rafforzate dal fatto che a partire dalla teoria delle stringhe si possono compiere scoperte incredibili sulla natura del mondo fisico, che rivelano una profonda e delicata coerenza nella struttura dell'universo. Nel linguaggio di poco sopra, si tratta soprattutto di caratteristiche generali che, indipendentemente dai dettagli che ci sono ancora ignoti, saranno le proprietà di base del nuovo universo fondato sulle stringhe. Le piú sorprendenti tra tutte hanno a che fare con le nostre nozioni di spazio e di tempo.

Capitolo decimo
La geometria quantica

Nel corso di appena una decina d'anni Einstein, con le sue sole forze, riuscì a demolire il paradigma newtoniano, vecchio di secoli, proponendo una spiegazione della gravità radicalmente nuova e ben piú profonda. Esperti e profani sono tutti prontissimi a cadere in deliquio di fronte all'assoluta genialità e alla sovrumana originalità dell'impresa compiuta da Einstein nel creare la relatività generale. Non si dovrebbero tuttavia perdere di vista le favorevoli circostanze storiche che contribuirono in modo determinante al successo di Einstein. La piú importante di queste è costituita dalle scoperte matematiche di Georg Bernhard Riemann, che definirono su solide basi il formalismo geometrico per descrivere spazi curvi di dimensione arbitraria. Nella famosa lezione inaugurale tenuta all'Università di Gottinga nel 1854, Riemann infranse la concezione euclidea dello spazio piatto e spianò il cammino a una teoria matematica che democraticamente studi la geometria di qualsiasi tipo di «superfici » curve. Sono le scoperte di Riemann che forniscono gli strumenti matematici per analizzare in modo quantitativo spazi non euclidei come quelli illustrati nelle figure 3.4 e 3.6. Fu merito del genio di Einstein riconoscere che quell'armamentario matematico era fatto su misura per formalizzare la sua nuova concezione della forza gravitazionale. La geometria di Riemann - dichiarò Einstein audacemente - è in accordo perfetto con la fisica della gravità.

Oggi, quasi un secolo dopo il *tour de force* di Einstein, la teoria delle stringhe ci fornisce una descrizione quantistica della gravità che, per forza di cose, modifica la relatività generale quando le distanze in gioco diventano dello stesso ordine della scala di Planck. Dato che la geometria riemanniana è il nocciolo matematico della relatività generale, ciò significa che anch'essa deve essere modificata per poter rispecchiare in modo adeguato la nuova fisica delle piccolissime distanze, tipica della teoria delle stringhe. Mentre la relatività generale asserisce che le proprietà di curvatura dell'universo sono descritte dalla geometria riemanniana, secondo la teoria delle stringhe ciò è vero soltanto se si esamina la struttura dell'universo a scale sufficientemente grandi. A scale piccole quanto la lunghezza di Planck deve manifestarsi una geometria completamente nuova, che sia in accordo con la nuova fisica della teoria delle stringhe. Questo nuovo paradigma geometrico prende il nome di *geometria quantica.*

A differenza di quel che accade per la geometria riemanniana, non esiste alcun trattato geometrico già bell'e pronto, sepolto magari in qualche scaffale di matematica, che i teorici delle stringhe possano consultare per la geometria quantica. Al contrario, fisici e matematici sono oggi strenuamente impegnati nello studio della teoria delle stringhe e, tassello dopo tassello, stanno mettendo insieme un settore del tutto nuovo della fisica e della matematica. Sebbene ci sia ancora molta strada da percorrere, queste ricerche hanno già messo in luce molte nuove proprietà dello spazio-tempo, che sono diretta conseguenza della teoria delle stringhe -proprietà che lo stesso Einstein avrebbe quasi certamente trovato eccitanti.

1. L'essenza della geometria riemanniana.

Se saltate su un tappeto elastico, il peso del vostro corpo, stirando le sue fibre elastiche, lo farà deformare. Questo stiramento è maggiore proprio sotto i vostri piedi e diventa quasi trascurabile verso il bordo del tappeto. Potete apprezzare chiaramente questo effetto dipingendo sul tappeto elastico un'immagine facilmente riconoscibile, per esempio quella della Gioconda. Se nessun peso è presente, la Gioconda ha il suo aspetto normale. Ma quando salite sul tappeto elastico, ecco che l'immagine della Gioconda si distorce, soprattutto nella regione che sta sotto i vostri piedi, come si vede

nella figura 10.1.

Questo esempio mette in luce il nocciolo della strategia matematica adottata da Riemann per descrivere spazi non piatti. Basandosi su precedenti intuizioni di matematici come Carl Friedrich Gauss, Nikolaj Lobaéevskij, Janos Bolyai e altri, Riemann mostrò che un'accurata analisi delle *distanze* fra tutti i punti di un dato oggetto geometrico fornisce un modo per quantificare la sua curvatura. In parole povere, quanto maggiore (e non uniforme) è lo stiramento - cioè, quanto maggiore è la deviazione dalle relazioni metriche che si misurano in uno spazio piatto - tanto maggiore è la curvatura dell'oggetto geometrico. Lo stiramento del tappeto elastico, ad esempio, è molto piú considerevole sotto i vostri piedi che altrove e perciò le relazioni metriche fra i punti di questa regione sono quelle che risultano maggiormente alterate. Questa zona del tappeto elastico ha dunque la curvatura piú accentuata, in accordo con quanto ci si poteva aspettare, dato che proprio qui l'immagine della Gioconda subisce la distorsione maggiore, tanto che l'ombra di una smorfia affiora all'angolo del suo sorriso immancabilmente enigmatico.

Einstein diede alle scoperte matematiche di Riemann una ben precisa interpretazione fisica, mostrando, come abbiamo visto nel capitolo III, che la curvatura dello spaziotempo rappresenta la forza gravitazionale. Analizziamo ora piú attentamente questa interpretazione. Matematicamente, la curvatura dello spaziotempo - proprio come la curvatura del tappeto elastico - rispecchia la distorsione delle relazioni metriche fra i suoi *punti.* Fisicamente, la forza gravitazionale che agisce su un oggetto è il riflesso diretto di tale distorsione. Immaginando di rendere l'oggetto sempre piú piccolo, la fisica e la matematica concordano con tanta maggior precisione quanto piú vicino si arriva a realizzare fisicamente l'astratto concetto matematico di punto. La teoria delle stringhe, tuttavia, pone un limite invalicabile alla precisione con cui la fisica della gravità può ricalcare il formalismo geometrico di Riemann, dato che esiste un limite oltre il quale non possiamo rendere piú piccolo nessun oggetto: arrivati alle stringhe, dobbiamo per forza di cose fermarci. La nozione tradizionale di particella puntiforme nella teoria delle stringhe non esiste, il che è essenziale affinché da essa sia possibile ottenere una teoria quantistica della gravità. Tutto ciò mostra in termini evidenti che i presupposti della geometria riemanniana, fondata sul concetto di distanza fra punti, a scale ultramicroscopiche vengono sovvertiti dalla teoria delle stringhe.

Figura 10.1.
Quando state in piedi sul tappeto elastico, l'immagine della Gioconda subisce la distorsione maggiore proprio sotto di voi.

Si deve dire che tutto ciò ha effetti minimi sulle applicazioni macroscopiche della relatività generale. Nell'elaborare modelli cosmologici, ad esempio, i fisici trattano abitualmente le galassie come se fossero punti, dato che le loro dimensioni, paragonate a quelle dell'intero universo, sono ridottissime. Per tale ragione, anche se usati in questo modo un po' grossolano, gli strumenti della geometria riemanniana forniscono un'approssimazione molto precisa, come dimostra il successo della relatività generale in ambito cosmologico. Nel mondo ultramicroscopico, tuttavia, il fatto stesso che le stringhe abbiano un'estensione implica che la geometria di Riemann non può essere il formalismo matematico giusto. E' dunque necessario, come ora vedremo, sostituirlo con quello della geometria quantica della teoria delle stringhe, che conduce a risultati profondamente nuovi e inattesi.

2. Lo scenario cosmico.

Secondo il modello cosmologico del big bang, l'intero universo sarebbe scaturito da un'unica esplosione cosmica, avvenuta piú o meno 15 miliardi di anni or sono. Come fu scoperto da Hubble, ancor oggi possiamo osservare come le schegge di questa esplosione - vale a dire molti miliardi di galassie - seguitino ad allontanarsi l'una dall'altra: l'universo si

sta espandendo. Non sappiamo se questa espansione continuerà per sempre o se, a un dato momento, rallenterà fino ad arrestarsi del tutto e farà quindi marcia indietro, generando un'implosione cosmica. Gli astronomi e gli astrofisici stanno cercando di risolvere la questione sperimentalmente, dato che la risposta dipende da qualcosa che in termini di principio si può misurare: la densità media di materia nell'universo.

Se la densità media di materia è superiore a una cosiddetta *densità critica,* pari a circa un centesimo di un miliardesimo di un miliardesimo di un miliardesimo (10-29) di grammo per centimetro cubo - equivalente a circa cinque atomi di idrogeno ogni metro cubo di universo - allora il cosmo è pervaso da una forza gravitazionale sufficiente ad arrestare l'espansione e a invertirne la direzione. Se invece la densità media di materia è inferiore alla densità critica, l'attrazione gravitazionale è troppo debole per fermare l'espansione cosmica, che continuerà dunque per sempre. (La nostra personale esperienza del mondo ci potrebbe indurre a credere che la densità media di materia sia immensamente superiore al valore critico. Bisogna però tenere presente che la materia - come il denaro - tende ad ammassarsi. Pensare che la densità media di materia della Terra, o del sistema solare, o anche della Via Lattea sia indicativa di quella dell'intero universo sarebbe come considerare il patrimonio di Bill Gates indicativo della ricchezza media dei comuni mortali. Cosí come il patrimonio della maggior parte di noi è insignificante se confrontato con quello di Bill Gates, e contribuisce dunque ad abbassare enormemente la media, nell'universo le galassie sono separate da regioni di spazio pressoché vuoto, che fanno si che la media complessiva della densità di materia sia drasticamente inferiore).

Studiando accuratamente la distribuzione delle galassie nello spazio cosmico, gli astronomi si sono fatti un'idea piuttosto precisa di quale sia la quantità media di materia visibile nell'universo, che risulta notevolmente inferiore al valore critico. Sussistono però numerose evidenze sperimentali e stringenti ragioni teoriche che depongono in favore dell'ipotesi secondo cui l'universo è pervaso di *materia oscura.* Si tratta di una materia che non interviene nei processi di fusione nucleare che riforniscono di energia le stelle e, perciò, non emette luce, rimanendo cosí invisibile ai telescopi degli astronomi. Nessuno è ancora riuscito a capire quale sia l'esatta natura della materia oscura, né tantomeno a calcolarne con precisione la quantità esistente. Il destino del nostro universo resta dunque un enigma.

Supponiamo ora - è solo un'ipotesi - che la densità di materia superi il valore critico: di conseguenza, nel lontano futuro arriverà il giorno in cui l'espansione si arresterà e l'universo comincerà a collassare su se stesso. Tutte le galassie inizieranno ad avvicinarsi l'una all'altra, dapprima con grande lentezza, poi sempre piú rapidamente, fino a raggiungere tutte quante una velocità sbalorditiva. Dovreste cercare di immaginarvi l'intero universo che si comprime in una massa cosmica che continua a contrarsi sempre di piú. Secondo una sequenza inversa a quella illustrata nel capitolo III, dalle sue dimensioni massime di molti miliardi di anni luce, l'universo si rimpicciolirà fino ad arrivare a quelle di appena qualche milione di anni luce, acquistando istante dopo istante sempre maggiore velocità e comprimendo ogni cosa in un ammasso delle dimensioni di una singola galassia, poi di una singola stella, di un pianeta, di un'arancia, di un pisello, di un granello di sabbia, e ancora continuerà a contrarsi, in accordo con le leggi della relatività generale, arrivando alle dimensioni di una molecola, di un atomo, e finendo, in un inesorabile big crunch cosmico, con l'essere del tutto privo di dimensione. Questo sostiene la teoria tradizionale: l'universo ebbe origine con un big bang a partire da uno stato di dimensione zero e, se la sua densità di massa è abbastanza elevata, avrà termine con un big crunch, che lo riporterà in un analogo stato finale di compressione cosmica definitiva.

Ma quando le distanze divengono dell'ordine della lunghezza di Planck, o addirittura inferiori, abbiamo ormai imparato che la meccanica quantistica toglie ogni valore alle equazioni della relatività generale: dobbiamo far ricorso alla teoria delle stringhe. E quindi naturale porsi la seguente domanda: se nella relatività generale di Einstein nulla vieta che la forma geometrica dell'universo possa diventare arbitrariamente piccola - proprio come in geometria riemanniana ogni spazio astratto può assumere le piú piccole dimensioni immaginabili - in che modo cambiano invece le cose nella teoria delle stringhe?

Come vedremo fra poco, anche in questo caso la teoria delle stringhe fissa un limite inferiore all'ordine di grandezza delle distanze fisicamente accessibili e stabilisce, in modo nuovo e originale, che nessuna delle dimensioni spaziali dell'universo può mai contrarsi fino a diventare piú corta della lunghezza di Planck.

Con la familiarità che abbiamo ormai acquisito con la teoria delle stringhe potremmo quasi essere tentati di azzardare una possibile risposta che spieghi come ciò avvenga. In fin dei conti - si può argomentare - per quanti punti si accatastino l'uno sull'altro (intendo, particelle puntiformi) il loro volume complessivo sarà sempre zero. Al contrario, se

queste particelle sono vere e proprie stringhe che si ammassano tutte insieme con orientazioni completamente casuali, esse formeranno un minuscolo grumo di volume non nullo, una specie di pallottola delle dimensioni di Planck formata da elastici aggrovigliati. Se avete fatto questo ragionamento, siete sulla strada giusta, ma ancora non avete colto alcune essenziali, seppur sottili caratteristiche della teoria delle stringhe, dalle quali consegue, in modo davvero elegante, che per l'universo esiste una dimensione minima. Queste caratteristiche mettono in luce molto concretamente la novità della fisica delle stringhe e i suoi effetti sulla geometria dello spaziotempo.

Per illustrare questi importanti aspetti prendiamo in esame un esempio che ci permetterà di eliminare molti dettagli non significativi senza pregiudicare la nuova fisica. Invece di considerare tutte le dieci dimensioni spaziotemporali della teoria delle stringhe - e nemmeno le quattro dimensioni estese che tutti conosciamo bene - torniamo al Tubuniverso. Abbiamo introdotto questo universo bidimensionale nel capitolo VIII, in un contesto antecedente alle stringhe, per spiegare alcuni aspetti delle intuizioni, risalenti agli anni venti, di Theodor Kaluza e Oskar Klein. Vogliamo ora usare questo modello come «scenario cosmico » per esplorare le proprietà della teoria delle stringhe in ipotesi semplici: le conclusioni alle quali giungeremo ci saranno utili per comprendere meglio tutte le dieci dimensioni spaziali previste dalla teoria. A questo scopo, supponiamo che la dimensione circolare del Tubuniverso, inizialmente bella pienotta, tenda ad assottigliarsi sempre di piú, avvicinandosi alla forma di Linelandia - una versione semplificata e parziale del big crunch.

La domanda alla quale cercheremo di rispondere è la seguente: il fatto che nell'universo vi siano stringhe oppure particelle puntiformi modifica in maniera significativa le caratteristiche geometriche e fisiche di questo collasso cosmico?

3. La nuova caratteristica essenziale.

Per scoprire qual è la nuova caratteristica essenziale della fisica delle stringhe non dobbiamo cercare chissà dove. Nel nostro ipotetico universo bidimensionale una particella puntiforme si può muovere soltanto nei modi illustrati nella figura 10. 2: o il suo movimento si svolge lungo la direzione assiale del tubo, o segue la circonferenza del tubo, o consiste in una combinazione di questi due movimenti. L'anello di una stringa può effettuare movimenti assolutamente analoghi, con la differenza che mentre si muove sulla superficie del tubo subisce un'oscillazione, come mostrato nella figura *10.3a.* Questa è una peculiarità importante, che abbiamo già esaminato abbastanza dettagliatamente: alcune caratteristiche della stringa, quali la massa e le cariche di gauge, sono determinate da queste oscillazioni. Ma non è a questo aspetto, sebbene cruciale, che dobbiamo rivolgere la nostra attenzione, dato che abbiamo già capito quali sono le sue conseguenze fisiche.

Esiste invece un'altra differenza tra i movimenti di una particella puntiforme e quelli di una stringa, una differenza che deve essere al centro del nostro interesse poiché dipende dalla forma dello spazio sul quale la stringa si muove. Essendo la stringa un oggetto esteso, esiste un'altra possibile configurazione oltre a quelle già ricordate. La stringa si può avvolgere, piú o meno come un cappio, attorno al Tubuniverso, come mostra la figura 10 A naturalmente, anche in questa nuova configurazione «estesa», continuerà a scorrere lungo il tubo e a oscillare. In realtà una stringa si può avvolgere attorno alla dimensione circolare dello spazio un qualunque numero finito di volte, come si vede nella figura 10.3b, e anche in questo caso oscillerà scorrendo lungo la direzione assiale.[1] Per completezza, dobbiamo osservare che, quantunque la maggior parte delle considerazioni che abbiamo svolto fino a questo punto si applichi tanto alle stringhe aperte (quelle i cui estremi non coincidono) quanto alle stringhe chiuse (quelle su cui abbiamo concentrato la nostra attenzione), nel caso specifico che ora consideriamo, i due tipi di stringa sembrano avere proprietà diverse. In effetti, una stringa aperta che si avvolge attorno a una dimensione circolare riuscirà sempre a srotolarsi. Ciò nonostante, nel 1989 Joe Polchinski dell'Università della California (Santa Barbara) e due suoi studenti, Jian-Hui Dai e Robert Leigh, dimostrarono che le conclusioni cui perveniamo in questo capitolo rimangono perfettamente valide anche per le stringhe aperte. Il loro lavoro, fra l'altro, ha avuto una cruciale importanza nella seconda rivoluzione delle superstringhe.

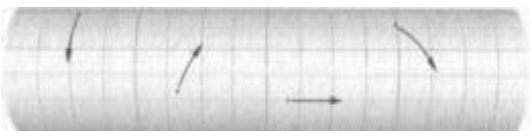
Figura 10.2.
Particelle puntiformi che si muovono sulla superficie di un cilindro.

Quando una stringa si trova in una configurazione di questo tipo, parleremo di *modo di avvolgimento.* E evidente che il modo di avvolgimento rappresenta una nuova possibilità di movimento che è tipica esclusivamente delle stringhe e non ha equivalente nel caso delle particelle puntiformi. Cercheremo ora di capire quali conseguenze ne derivino sia per la stringa stessa sia per le proprietà geometriche della dimensione spaziale attorno alla quale questa si arrotola.

4. La fisica delle stringhe arrotolate.

Nella precedente discussione sul moto delle stringhe, abbiamo focalizzato la nostra attenzione al caso delle stringhe che non sono arrotolate attorno a una dimensione circolare dello spazio. Le stringhe arrotolate hanno piú o meno tutte le stesse proprietà delle stringhe che abbiamo finora studiato. Le loro oscillazioni - come per le stringhe non arrotolate - contribuiscono in maniera significativa a specificare le loro proprietà osservate. La differenza essenziale sta nel fatto che una stringa arrotolata ha una massa *minima,* determinata dalla *lunghezza* della dimensione circolare e dal numero di volte che vi si arrotola attorno. Le oscillazioni della stringa apportano un contributo che incrementa questa quantità minima.

Figura 10.3.
Le stringhe si possono muovere sulla superficie del cilindro in due configurazioni differenti: «arrotolata» e «non arrotolata».

Non è difficile capire il perché di questa massa minima. Una stringa arrotolata ha una lunghezza minima determinata dalla lunghezza della circonferenza della dimensione circolare e dal numero di volte che essa vi gira intorno. La lunghezza minima di una stringa determina la sua massa minima: avremo infatti «piú» stringa quanto maggiore è questa lunghezza. Dato che la circonferenza è proporzionale al raggio, il minimo della massa dipendente dal modo di avvolgimento di una stringa arrotolata è proporzionale al raggio della dimensione circolare attorno alla quale si avviluppa. Usando l'equazione di Einstein E = mc2 che dà l'equivalenza di massa ed energia, possiamo anche dire che l'energia di una stringa arrotolata è proporzionale al raggio della dimensione circolare. (Anche le stringhe non arrotolate hanno una lunghezza minima, per quanto piccolissima; se cosí non fosse, infatti, avremmo di nuovo a che fare con particelle puntiformi. Lo stesso ragionamento ci porterebbe a concludere che anche le stringhe non arrotolate hanno una massa minima, piccolissima ma diversa da zero. In un certo senso questo è vero, ma gli effetti quantistici descritti nel capitolo VI (nel paragrafo Tre *conseguenze della rigidità delle stringhe)* sono in grado di cancellare in maniera esatta questo contributo non nullo. E per tale motivo - lo ricordiamo - che le stringhe non arrotolate possono dare luogo a particelle prive di massa, come il fotone, o alle altre particelle di massa nulla o quasi nulla. Da questo punto di vista le stringhe arrotolate sono del tutto differenti).

Quali effetti produce l'esistenza di configurazioni di avvolgimento sulle proprietà *geometriche* delle dimensioni spaziali attorno alle quali si arrotola la stringa? La risposta a questo interrogativo, individuata nel 1984 dai fisici giapponesi Keiji Kikkawa e Masami Yamasaki, è significativa e sorprendente.

Torniamo a considerare la nostra variante del big crunch, analizzando le ultime fasi del collasso del Tubuniverso. Mentre il raggio della dimensione circolare si contrae fino alla lunghezza di Planck e, obbedendo ai dettami della relatività generale, continua a contrarsi sempre di piú, la teoria delle stringhe oppone una strenua resistenza, proponendo un'interpretazione radicalmente diversa del processo in atto. La teoria delle stringhe asserisce che *tutti i processi* fisici nel Tubuniverso nei quali il raggio della dimensione circolare è minore della lunghezza di Planck e decrescente nel tempo sono assolutamente identici ai processi fisici nei quali il raggio è maggiore della lunghezza di Planck e crescente nel tempo! Ciò significa che per quanto la dimensione circolare si sforzi di andare al di sotto della lunghezza di Planck, i suoi tentativi sono vanificati dalla teoria delle stringhe, che capovolge la situazione geometrica.

La teoria delle stringhe mostra che questa evoluzione si può riformulare -reinterpretare esattamente - come se la dimensione circolare si contraesse fino alla lunghezza di Planck e successivamente iniziasse a espandersi di nuovo. Le leggi

della geometria dello spaziotempo alla scala di Planck sono in tal modo sovvertite, e quel che prima appariva come un collasso cosmico ora è visto come una specie di rimbalzo *(bounce) co*smico. La dimensione circolare può contrarsi fino alla lunghezza di Planck ma, a causa dell'esistenza dei modi di avvolgimento di stringa, i tentativi di diminuire ulteriormente si traducono in un'espansione. Vediamo perché.

5. Lo spettro degli stati di stringa.*

** In questo e nei prossimi paragrafi presenteremo alcune idee piuttosto complicate; il lettore non si scoraggi se - specialmente in prima lettura - troverà difficile seguire tutti i passaggi logici del ragionamento.*

Le nuove possibilità di configurazione per una stringa arrotolata attorno alla dimensione circolare del Tubuniverso comportano che la sua energia abbia *due* origini: energia di vibrazione, dovuta alle oscillazioni della stringa durante il moto, ed energia di avvolgimento. Secondo gli insegnamenti di Kaluza e Klein, ciascun tipo di energia dipende dalla geometria del tubo, cioè dal raggio della sua dimensione circolare, ma in una maniera che deve essere tipicamente «stringhesca», dato che le particelle puntiformi non possono avvolgersi attorno a nessuna dimensione. Il nostro primo compito, perciò, sarà quello di determinare con precisione in che modo il contributo energetico di vibrazione e quello di avvolgimento dipendano dalla misura della dimensione circolare. A tale scopo conviene differenziare nel moto di una stringa due possibili tipi di vibrazioni: vibrazioni *uniformi* e *ordinarie.* Le vibrazioni ordinarie non sono altro che le solite oscillazioni di cui abbiamo discusso già molte volte, ad esempio quelle illustrate nella figura 6.2. Le vibrazioni uniformi hanno a che vedere con tipi di movimento ancora piú semplici: il movimento complessivo della stringa mentre scorre da una posizione all'altra lungo la direzione assiale, senza modificare la propria forma. Tutti i possibili movimenti della stringa risultano da una combinazione di movimenti di scorrimento e di oscillazione (vibrazioni uniformi e vibrazioni ordinarie); distinguere gli uni dagli altri renderà però piú semplice l'argomentazione che svilupperemo. In effetti, le vibrazioni ordinarie avranno un ruolo soltanto secondario nella nostra analisi, e quindi terremo conto del loro effetto soltanto dopo aver chiarito qual è il succo del ragionamento.

Innanzi tutto due osservazioni essenziali. Primo: le eccitazioni vibrazionali uniformi di una stringa hanno un'energia che è *inversamente* proporzionale al raggio della dimensione circolare. Questo fatto è una conseguenza diretta del principio di indeterminazione: se il raggio diventa piú piccolo, la stringa è confinata in uno spazio piú angusto e, per effetto della claustrofobia quantistica, la sua quantità di energia cinetica - quella cioè dovuta al moto - aumenta. Cosí, quanto minore è il raggio della dimensione circolare, tanto maggiore è l'energia cinetica della stringa - e questa è proprio l'inconfondibile caratteristica di una relazione di proporzionalità inversa. Secondo: come abbiamo mostrato nel paragrafo precedente, le quantità di energia di avvolgimento sono *direttamente* - non inversamente -proporzionali al raggio. Da queste due osservazioni possiamo concludere che per grandi valori del raggio della dimensione circolare si avranno grandi energie di avvolgimento e piccole energie vibrazionali, mentre, al contrario, per piccoli valori del raggio si avranno piccole energie di avvolgimento e grandi energie vibrazionali.

Eccoci giunti al nocciolo della questione: per ogni valore grande del raggio della dimensione circolare del Tubuniverso, esiste un corrispondente valore piccolo del raggio per il quale le energie di avvolgimento delle stringhe nel primo universo sono uguali alle energie vibrazionali delle stringhe nel secondo universo. Dato che tutte le proprietà fisiche risentono soltanto dell'energia *totale* di una configurazione di stringa e sono indipendenti dal modo in cui questa energia è suddivisa in contributi vibrazionali e di avvolgimento, non sussiste alcuna *distinzione fisica* tra queste due forme *geometricamente* distinte del nostro universo. In conclusione, per quanto possa suonare strano, la teoria delle stringhe asserisce che non esiste differenza alcuna fra un universo che abbia la forma di tubo « grasso » e uno che abbia la forma di un tubo « smilzo ».

Si tratta di una sorta di meccanismo di copertura del rischio, non diverso da quello che adotterebbe un investitore avveduto che si trovasse di fronte al seguente dilemma. Immaginate di venire a sapere che due titoli azionari di Wall Street - poniamo, ad esempio, una società che produce attrezzi per la fitness e una società che produce by-pass cardiaci - hanno un andamento indissolubilmente legato l'uno all'altro. Entrambi hanno chiuso le contrattazioni odierne con la quotazione di un dollaro per azione e un informatore attendibile vi dice che se i titoli di una delle due società saranno in rialzo quelli dell'altra società saranno in ribasso e viceversa. Il vostro informatore - che è in tutto e per tutto degno di fede (ma i cui consigli rischiano di sconfinare nell'illegalità) - vi assicura inoltre che, il giorno successivo, le quotazioni di chiusura delle due società saranno senza ombra di dubbio inversamente proporzionali l'una all'altra. Se un titolo, cioè,

chiuderà a *2* dollari per azione, l'altro chiuderà a mezzo dollaro per azione; oppure, se un titolo chiuderà a 10 dollari per azione, l'altro chiuderà a un decimo di dollaro per azione, e cosí via. Una sola cosa il vostro informatore non è in grado di rivelarvi: quale titolo sarà in rialzo e quale in ribasso. Che cosa fate?

E' ovvio: senza il minimo indugio investirete in borsa tutti i vostri risparmi, suddividendoli in parti uguali fra le azioni delle due società. Non è infatti difficile verificare che qualunque sia l'andamento del mercato il vostro capitale non potrà mai diminuire. Nell'ipotesi peggiore andrete in pari (se entrambe le società chiuderanno di nuovo a 1 dollaro), ma qualsiasi altra fluttuazione del costo delle azioni - purché conforme alle informazioni che avete ricevuto - vi procurerà un guadagno. Se per esempio la società di fitness chiuderà a *4* dollari e la società di by-pass a un quarto di dollaro, il valore complessivo di ogni paio di azioni sarà pari a *4,25* dollari, rispetto ai *2* dollari del giorno prima. Per quel che riguarda la crescita del vostro capitale, inoltre, è assolutamente irrilevante quale delle due società chiuderà in rialzo e quale in ribasso. Se vi interessano soltanto i soldi, le due eventualità possibili sono finanziariamente indistinguibili.

Quel che accade nella teoria delle stringhe è del tutto analogo, in quanto l'energia delle configurazioni di stringa proviene da due fonti vibrazioni e avvolgimenti - i cui contributi all'energia totale di una stringa sono in genere differenti. Tuttavia, come vedremo fra poco in maggior dettaglio, esistono situazioni geometriche, che si presentano in coppia (una è caratterizzata da alta energia di avvolgimento/bassa energia di vibrazione e l'altra viceversa) e sono indistinguibili dal punto di vista fisico. In effetti, a differenza dell'esempio finanziario (in cui è sempre possibile distinguere tra i due pacchetti di azioni non limitandosi a considerare soltanto il capitale complessivo), non sussiste assolutamente nessuna distinzione fisica tra i due scenari di stringa che ne derivano.

In realtà, vedremo che per rendere piú calzante l'analogia con la teoria delle stringhe, dovremmo considerare anche che cosa succede se, invece di dividere il vostro capitale iniziale in due parti uguali tra le due società, comprate, poniamo, 1000 azioni della società di fitness e 3000 azioni della società di by-pass cardiaci. In questo caso il valore totale dei titoli in vostro possesso dipende da quale società chiuderà in rialzo e quale in ribasso. Se per esempio le azioni della fitness chiuderanno a 10 dollari e quelle dei bypass a 10 centesimi, il vostro investimento iniziale di *4000* dollari sarà cresciuto a 10.300 dollari. Se si verifica il contrario (azioni della fitness a 10 centesimi, azioni dei by-pass a 10 dollari), il vostro capitale azionario toccherà *i* 30.100 dollari - una cifra decisamente superiore.

Una cosa è comunque garantita dalla relazione di proporzionalità che lega i costi delle azioni delle due società alla chiusura della borsa. Se una vostra amica investe in modo esattamente opposto al vostro (3000 azioni della società di fitness e 1000 azioni della società di by-pass), il valore totale dei suoi titoli sarà di 10.300 dollari nel caso di chiusura della borsa con by pass in rialzo/fitness in ribasso (lo stesso che voi avreste nel caso di chiusura con fitness in rialzo/by-pass in ribasso) e di 30.100 dollari nel caso di chiusura con fitness in rialzo/by-pass in ribasso (lo stesso che voi avreste nel caso di chiusura con by pass in rialzo/fitness in ribasso). Dal punto di vista del valore complessivo dei titoli azionari in vostro possesso, cioè, l'operazione di scambiare tra loro le azioni che chiudono in rialzo e quelle che chiudono in ribasso controbilancia esattamente l'operazione di scambiare tra loro le quantità di azioni che possedete di ciascuna società.

Torniamo ora alla teoria delle stringhe, tenendo presente quest'ultima osservazione, ed esaminiamo le possibili energie di stringa in un esempio specifico. Supponiamo che il raggio della dimensione circolare del nostro Tubuniverso sia pari a dieci volte la lunghezza di Planck. Scriveremo dunque R = 10. Una stringa può avvolgersi attorno a questa dimensione circolare una volta, due volte, tre volte e cosí via. Il numero di volte che una stringa si arrotola attorno alla dimensione circolare è detto il *numero di avvolgimento* della stringa. L'energia di avvolgimento della stringa, essendo determinata dalla lunghezza della stringa arrotolata, è proporzionale al prodotto del raggio e del numero di avvolgimento. Oltre a questa energia di avvolgimento, la stringa effettua anche movimenti di vibrazione. Dato che le vibrazioni uniformi - le uniche di cui stiamo ora tenendo conto - hanno energie che dipendono in maniera inversamente proporzionale dal raggio, queste sono multipli interi dell'inverso del raggio, che nel nostro caso è uguale a un decimo della lunghezza di Planck. Chiameremo questi multipli interi *numeri di vibrazione.*[2] Nel caso vi domandaste come mai le possibili energie di vibrazione uniforme debbano essere multipli interi di 1/R, vi basterà ripensare alla discussione sulla meccanica quantistica che abbiamo svolto nel capitolo IV, in particolare, all'esempio del proprietario crudele. Abbiamo imparato che la meccanica quantistica impone che l'energia, come il denaro, sia costituita da pacchetti discreti; numeri interi che sono multipli di varie unità di energia. Nel caso del moto di vibrazione uniforme di una stringa nel Tubuniverso, questa unità di energia è proprio 1/R, come abbiamo dimostrato nel testo appellandoci al principio di indeterminazione. Di conseguenza, le energie di vibrazione uniforme sono multipli interi di 1/R.

Come potete vedere la situazione è molto simile a quella che abbiamo incontrato a Wall Street: i numeri di avvolgimento e di vibrazione sono analoghi al numero di azioni di ciascuna società in vostro possesso, mentre *R* e *1/R* sono analoghi alle quotazioni di chiusura delle singole azioni di ciascun pacchetto. Cosí come potete calcolare facilmente il valore totale del vostro investimento in termini di numero di azioni che possedete di ciascuna società in base alle quotazioni di chiusura, potete anche calcolare l'energia totale di una stringa sulla base del suo numero di vibrazione, del suo numero di avvolgimento e del raggio *R.* Nella tabella 10.1 forniamo un elenco parziale di queste energie totali nel caso di varie configurazioni di stringa, specificando il loro numero di avvolgimento e di vibrazione, supponendo che il Tubuniverso abbia raggio *R = 10.*

Una tabella completa sarebbe infinitamente lunga, dato che i numeri di avvolgimento e di vibrazione possono assumere qualunque valore intero; i dati parziali che presentiamo sono tuttavia sufficientemente rappresentativi ai fini della nostra discussione. Dalla tabella 10.1 e dalle osservazioni precedenti risulta chiaro che siamo in una situazione di alta energia di avvolgimento/bassa energia di vibrazione: le energie di avvolgimento sono multipli di 10, mentre le energie di vibrazione sono multipli di 1/10.

Immaginiamo ora che il raggio della dimensione circolare si contragga, passando da 10 a 9,2, a *7,1,* e giú giú a *3,4,* 2,2, 1,1, *0,7,* per fermarsi infine -quantomeno per quel che ci interessa qui - al valore di 0,1 (ossia 1/10). Anche per questo Tubuniverso, geometricamente diverso dal precedente, possiamo compilare un'analoga tabella delle energie di stringa: le energie di avvolgimento sono in questo caso multipli interi di 1/10, mentre le energie di vibrazione sono multipli interi del suo inverso, 10. I risultati ottenuti sono elencati nella tabella 10.2.

Tabella 10.1

Alcuni valori delle configurazioni di vibrazione e di avvolgimento di una stringa che si muove nell'universo mostrato nella figura 10 - 3, con raggio R = 10. Le energie di vibrazione danno contributi multipli di 1/10, mentre le energie di avvolgimento danno contributi multipli di 10; l'energia totale è la somma delle due. L'unità di misura dell'energia è l'energia di Planck.

Numero di vibrazione	*Numero di avvolgimento*	*Energia totale*
1	1	1/10 + 10 = 10,1
1	2	1/10 + 20 = 20,1
1	3	1/10 + 30 = 30,1
1	4	1/10 + 40 = 40,1
2	1	2/10 + 10 = 10,2
2	2	2/10 + 20 = 20,2
2	3	2/10 + 30 = 30,2
2	4	2/10 + 40 = 40,2
3	1	3/10 + 10 = 10,3
3	2	3/10 + 20 = 20,3
3	3	3/10 + 30 = 30,3
3	4	3/10 + 40 = 40,3
4	1	4/10 + 10 = 10,4
4	2	4/10 + 20 = 20,4
4	3	4/10 + 30 = 30,4
4	4	4/10 + 40 = 40,4

A prima vista le due tabelle possono sembrare diverse. A un esame piú attento, tuttavia, si scopre che nella colonna delle «energie totali» compaiono gli stessi numeri, sebbene ordinati in maniera diversa. Per trovare quale riga della tabella 10.2 corrisponde a una data riga della tabella 10.1 è sufficiente scambiare tra loro il numero di vibrazione e il numero di avvolgimento. In altre parole, i contributi energetici di avvolgimento e di vibrazione svolgono ruoli complementari quando

il raggio della dimensione circolare passa da 10 a 1/10. Dal punto di vista delle energie totali di stringa, pertanto, non c'è differenza alcuna tra i due universi che hanno questi diversi raggi della dimensione circolare. Proprio come lo scambio tra fitness in rialzo/by-pass in ribasso è esattamente controbilanciato dallo scambio tra il numero di azioni di ciascuna società, cosí lo scambio tra raggio 10 e raggio 1/10 è esattamente controbilanciato dallo scambio tra numeri di vibrazione e numeri di avvolgimento. Naturalmente, anche se per semplicità abbiamo trattato solo il caso in cui il raggio iniziale è *R = 10* e il suo inverso è 1/10, le conclusioni che abbiamo raggiunto rimangono valide per una qualsiasi scelta del raggio e del suo inverso.[3] Matematicamente, l'uguaglianza tra le energie di stringa in universi le cui dimensioni circolari abbiano raggio *R* o 1/R è conseguenza del fatto che queste energie sono della forma *v/R + wR*, dove *v* è il numero di vibrazione e *w* il numero di avvolgimento. Questa espressione è invariante rispetto allo scambio simultaneo di *v* con *w* e di *R* con 1/R - cioè rispetto allo scambio del numero di vibrazione con il numero di avvolgimento e del raggio con il suo inverso. Nel nostro ragionamento lavoriamo in unità di Planck, ma potremmo anche adottare unità di misura piú convenzionali riscrivendo la formula dell'energia di stringa in termini di ℓ' la cosiddetta scala di stringa - il cui valore è circa uguale alla lunghezza di Planck, pari a 10^{-33} centimetri. Possiamo allora scrivere l'energia di stringa nella forma *v/R + wR/ℓ',* un'espressione invariante rispetto allo scambio di *v* con *w* e di *R* con *ℓ'/R,*- queste due lunghezze sono ora espresse in termini di unità di misura convenzionali.

Tabella 10.2. Come nella tabella 10.1, tranne che il raggio è 1/10.

Numero di vibrazione	*Numero di avvolgimento*	*Energia totale*
1	1	10 + 1/10 = 10,1
1	2	10 + 2/10 = 10,2
1	3	10 + 3/10 = 10,3
1	4	10 + 4/10 = 10,4
2	1	20 + 1/10 = 20,1
2	2	20 + 2/10 = 20,2
2	3	20 + 3/10 = 20,3
2	4	20 + 4/10 = 20,4
3	1	30 + 1/10 = 30,1
3	2	30 + 2/10 = 30,2
3	3	30 + 3/10 = 30,3
3	4	30 + 4/10 = 30,4
4	1	40 + 1/10 = 40,1
4	2	40 + 2/10 = 40,2
4	3	40 + 3/10 = 40,3
4	4	40 + 4/10 = 40,4

Le tabelle 10.1 e 10.2 sono incomplete per due ragioni. In primo luogo, come abbiamo già osservato, vi abbiamo elencato soltanto pochi degli infiniti valori che possono assumere il numero di avvolgimento e quello di vibrazione di una stringa. Questo, però, non crea alcun problema: potremmo prolungare la tabella fin dove arriva la nostra pazienza e la relazione che abbiamo ottenuto continuerebbe a essere valida. In secondo luogo, oltre all'energia di avvolgimento, ci siamo limitati a considerare soltanto i contributi energetici dovuti al moto di vibrazione uniforme di una stringa. Dovremmo ora cercare di includere nella nostra descrizione anche le vibrazioni ordinarie, dato che danno un contributo aggiuntivo all'energia totale della stringa e determinano le sue cariche. Alcune ricerche teoriche hanno tuttavia mostrato - e questo è il punto essenziale - che i contributi energetici dovuti alle vibrazioni ordinarie non dipendono dal valore del raggio. Di conseguenza, anche se volessimo completare le tabelle 10.1 e 10.2 tenendo conto delle vibrazioni ordinarie, non cambierebbe nulla, dato che i contributi energetici dovuti a queste vibrazioni incidono nella stessa identica maniera su entrambe le tabelle. Possiamo pertanto concludere che le masse e le cariche delle particelle in un Tubuniverso con raggio *R* sono esattamente identiche a quelle delle particelle in un universo con raggio *1/R.* Poiché la fisica fondamentale è governata da queste masse e queste cariche, non c'è modo di distinguere dal punto di vista fisico tra questi due universi pur geometricamente distinti. Per ogni esperimento effettuato nel primo universo esiste un esperimento gemello nel secondo universo, che conduce agli stessi risultati.

6. Una controversia.

George e Mildred, che si sono appiattiti fino a diventare esseri bidimensionali, prendono dimora nel Tubuniverso, sono nominati professori di fisica e impiantano due laboratori, l'uno in competizione con l'altro. Dopo un po' di tempo, affermano, indipendentemente l'uno dall'altra, di aver determinato il raggio della dimensione circolare. Sorprendentemente, però, i loro risultati non concordano, nonostante che entrambi abbiano fama di ricercatori molto precisi e scrupolosi. George sostiene che il raggio è *R=10* volte la lunghezza di Planck, mentre Mildred sostiene che il raggio è *R = 1/10* della lunghezza di Planck.

«Mildred - dice George - sulla base dei miei calcoli di teoria delle stringhe so che, se la dimensione circolare ha raggio *R = 10,* allora si devono osservare stringhe le cui energie sono quelle elencate nella tabella 10.1. Ho effettuato un gran numero di esperimenti con il mio nuovo acceleratore - abbastanza potente da raggiungere l'energia di Planck - e queste previsioni teoriche sono state confermate con assoluta precisione. Posso perciò asserire con certezza che la dimensione circolare ha raggio *R = 10* ». Mildred, a sostegno delle proprie affermazioni, adduce le stesse argomentazioni di George, con la differenza che il suo elenco delle energie di stringa è quello fornito dalla tabella 10.2, il che conferma appunto che il raggio sia *R = 1/ 10.*

Illuminata da un'intuizione folgorante, Mildred mostra a George che le due tabelle sono in realtà identiche, a parte il fatto che i valori delle energie di stringa sono ordinati in modo diverso. Ma George, che è notoriamente un po' piú lento di Mildred nel ragionamento, replica: « Come può essere? So che valori differenti del raggio danno luogo - in base alle leggi della meccanica quantistica e alla proprietà delle stringhe arrotolate - a differenti valori possibili per le energie e le cariche di stringa. Se i nostri risultati concordano su questi ultimi valori, allora devono concordare anche sul valore del raggio ».

Mildred, che ha ormai penetrato i segreti della fisica delle stringhe, gli ribatte: « Ciò che dici è quasi giusto, ma sbagliato. E' vero, in genere, che due diversi valori del raggio danno luogo a diverse energie accessibili. Ciò nonostante, nel caso particolare in cui i due valori del raggio siano l'uno l'inverso dell'altro - come 10 e 1/10 - le energie e le cariche di stringa risultano essere identiche. Vedi, tu chiami modo di avvolgimento quello che io chiamerei modo di vibrazione, mentre chiami modo di vibrazione quello che io chiamerei modo di avvolgimento. Ma alla natura non interessa il linguaggio che usiamo. La fisica è governata soltanto dagli ingredienti fondamentali, le masse (cioè, le energie) delle particelle e le cariche che queste trasportano. Se il raggio è uguale a 10 oppure a 1/10, l'elenco completo delle proprietà degli ingredienti fondamentali nella teoria delle stringhe rimane lo stesso».

Anche George finalmente afferra: «Ma sí, penso di aver capito. Sebbene le descrizioni delle stringhe che tu e io diamo siano differenti nei dettagli, riguardo alle loro vibrazioni o al loro avvolgimento attorno alla dimensione circolare, tuttavia l'elenco completo delle caratteristiche fisiche che otteniamo è esattamente lo stesso. Dato che le proprietà fisiche dell'universo dipendono unicamente da queste caratteristiche dei componenti fondamentali, non c'è modo di fare distinzione, di differenziare due valori del raggio che siano l'uno l'inverso dell'altro ». Giustissimo.

7. Tre domande.

A questo punto qualcuno potrebbe dire: « Senti un po', se io fossi un omino appiattito nel Tubuniverso, non farei altro che misurare la circonferenza con un metro flessibile e riuscirei cosí a determinare il raggio una volta per tutte. Basta con tutte queste chiacchiere e queste assurdità sull'esistenza di due universi indistinguibili ma con raggi diversi. E se è vero che la teoria delle stringhe ha messo al bando tutte le distanze che sono minori della lunghezza di Planck, come mai stiamo qui a cianciare di raggi che sono una frazione di questa lunghezza? Infine, già che ci siamo, chi se ne infischia di questo improbabile universo bidimensionale a forma di tubo! Che cosa succede se teniamo conto di tutte le dimensioni? »

Iniziamo con l'ultima domanda, dato che la risposta ci obbligherà ad affrontare anche le prime due.

Ci siamo limitati a discutere del Tubuniverso, considerando due sole dimensioni spaziali - una estesa e l'altra compattificata (arrotolata) soltanto per semplificare l'esposizione. Anche se avessimo tre dimensioni spaziali estese e sei dimensioni circolari - e queste ultime formerebbero cosí il piú semplice esempio di spazio di Calabi-Yau - le conclusioni cui giungeremmo sarebbero esattamente le stesse. Scambiando il raggio di ogni circonferenza con il suo inverso si otterrebbe un nuovo universo fisicamente identico al primo.

Ma possiamo spingere ancora oltre il nostro ragionamento, facendo un gigantesco balzo concettuale. Ciascuna delle tre dimensioni macroscopiche dell'universo sembra estendersi, sulla base delle osservazioni astronomiche, per circa *15* miliardi di anni luce (un anno luce è pari a circa a *9500* miliardi di chilometri, sicché questa distanza è circa uguale a 142.000 miliardi di miliardi di chilometri). Come abbiamo già sottolineato nel capitolo VIII, niente e nessuno ci dice che succeda al di là di questo limite. Le tre dimensioni spaziali potrebbero continuare all'infinito o magari incurvarsi, assumendo la forma di enormi circonferenze, ben oltre i limiti di risoluzione degli attuali telescopi. Se fosse vera la seconda ipotesi, un astronauta che viaggiasse nello spazio, proseguendo sempre nella stessa direzione finirebbe per girare intorno all'intero universo, come Magellano nel suo viaggio di circumnavigazione terrestre, e ritornare al punto di partenza.

Le tre dimensioni spaziali macroscopiche, quindi, potrebbero benissimo avere forma circolare ed essere quindi soggette all'identificazione fisica *R-1/R* imposta della teoria. Proviamo ad abbozzare qualche calcolo spicciolo: se le tre dimensioni spaziali macroscopiche sono circolari, i loro raggi devono essere dell'ordine di *15* miliardi di anni luce - una distanza pari a circa dieci milioni di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di volte la lunghezza di Planck *(R = 1061)* e diventano sempre piú grandi via via che l'universo si espande. Se la teoria delle stringhe è corretta, tutto questo dovrebbe essere fisicamente identico a una situazione in cui le tre dimensioni spaziali ordinarie avrebbero la forma di circonferenze davvero minuscole, con un raggio pari a circa *1/R = 1/(1061)* = 10-61 moltiplicato la lunghezza di Planck. Ecco che cosa diventano le consuete tre dimensioni estese nella descrizione alternativa - duale - che ci offre la teoria delle stringhe! E in realtà, in questo linguaggio inverso, i minuscoli raggi di queste circonferenze diventano sempre piú piccoli con il trascorrere del tempo, dato che *1/R* decresce all'aumentare di *R.* Arrivati a questo punto, però, sembra che stiamo davvero dando i numeri. Com'è mai possibile che ciò sia vero? Com'è mai possibile che un essere umano alto un metro e ottanta «entri» in un universo cosí incredibilmente microscopico? Com'è mai possibile che questo granellino di universo sia fisicamente identico al grande manto stellato che vediamo sopra di noi? Per di piú, ora siamo costretti a dare risposta alla seconda delle nostre tre domande: la teoria delle stringhe avrebbe dovuto eliminare ogni possibilità di misurare sperimentalmente distanze minori della lunghezza di Planck. Ma se una dimensione circolare ha raggio *R* maggiore della lunghezza di Planck, l'inverso del raggio, *1/R,* sarà necessariamente una frazione della lunghezza di Planck. E allora ? La risposta, che ci permetterà di risolvere anche l'ultima delle nostre tre domande, metterà in luce un aspetto importante e delicato delle nozioni di spazio e distanza.

8. Due nozioni di distanza.

Nella nostra comprensione del mondo il concetto di distanza è talmente basilare che è facile sottovalutare la sua portata e la sua profondità. Le sorprendenti conseguenze che la teoria della relatività speciale e generale hanno sulla nostra concezione di spazio e tempo e le nuove caratteristiche che emergono dalla teoria delle stringhe ci suggeriscono di procedere con cautela anche nella definizione di distanza. Le definizioni migliori in fisica sono quelle operative - vale a dire, definizioni che indicano un modo di misurare, almeno in linea di principio, gli oggetti che si intendono definire. Per quanto un concetto possa essere astratto, una sua definizione operativa ci consente di ridurre il suo significato a una procedura sperimentale per misurare il suo valore.

Come possiamo dare una definizione operativa del concetto di distanza? La risposta a questo interrogativo nell'ambito della teoria delle stringhe riserva alcune sorprese. Nel 1988, i fisici Robert Brandenberger (della Brown University) e Cumrum Vafa (della Harvard University) misero in evidenza che se una dimensione spaziale ha forma circolare, nella teoria delle stringhe esistono due definizioni operative di distanza, che sono differenti, sebbene correlate. Ciascuna prevede una diversa procedura sperimentale per misurare la distanza, che è fondata, grossomodo, sul principio secondo il quale, se un oggetto di prova - una «sonda» - viaggia a una certa velocità assegnata, possiamo misurare una data distanza determinando quanto tempo impiega l'oggetto di prova a percorrerla. La differenza tra le due procedure sta nella scelta dell'oggetto di prova. La prima definizione usa stringhe che *non* sono arrotolate attorno a una dimensione circolare, mentre la seconda definizione usa stringhe che sono arrotolate. E' proprio il carattere esteso dell'oggetto di prova che fa sí che nella teoria delle stringhe ci siano due diverse definizioni operative, entrambe ugualmente naturali, della nozione di distanza. In una teoria particellare il concetto stesso di avvolgimento non esiste, e cosí abbiamo una sola definizione possibile di distanza.

In che modo differiscono i risultati di queste due procedure sperimentali? La risposta scoperta da Brandenberger e Vafa è tanto sorprendente quanto sottile. L'idea di fondo si può capire facendo ricorso al principio di indeterminazione. Le stringhe non arrotolate si possono muovere liberamente attorno alla circonferenza e determinano in tal modo una distanza che è proporzionale al raggio *R.* Per il principio di indeterminazione la loro energia è proporzionale a *1/R* (nel capitolo VI abbiamo stabilito che sussiste una relazione di proporzionalità inversa tra l'energia di un oggetto di prova e le distanze che esso è in grado di discriminare). D'altro canto, abbiamo visto che le stringhe arrotolate hanno un'energia minima proporzionale a *R;* se le usiamo come « sonde » per misurare le distanze, il principio di indeterminazione ci dice che esse sono « sensibili » a distanze pari all'inverso di questo valore, cioè *1/R.* Traducendo in termini matematici questa idea, si trova dunque che, se usiamo stringhe non arrotolate come oggetti di prova per determinare il raggio di una dimensione circolare dello spazio, otterremo una misura uguale a *R,* mentre, se usiamo stringhe arrotolate, otterremo una misura uguale a *1/R* (anche in questo caso, come abbiamo fatto finora, misuriamo le distanze in multipli della lunghezza di Planck). Entrambi i risultati di questi esperimenti possono rivendicare uguale diritto a essere considerati come la misura del raggio di una dimensione circolare: la teoria delle stringhe ci insegna dunque che usando oggetti di prova diversi possiamo ottenere misure diverse. In effetti, questa proprietà non riguarda solo la determinazione del raggio delle dimensioni circolari, ma si estende a tutte le possibili misure di lunghezze e distanze. In tutti i casi, i risultati ottenuti usando come oggetti di prova stringhe arrotolate o non arrotolate sono sempre uno l'inverso dell'altro.[4] Vi potreste chiedere com'è possibile che una stringa che circonda una dimensione circolare di raggio *R* dia una misura di tale raggio uguale a *1/R.* Per quanto legittima, questa domanda è però formulata in maniera imprecisa e fuorviante. Quando diciamo che la stringa è arrotolata attorno a una circonferenza di raggio *R,* ci troviamo costretti a impiegare una certa definizione di distanza (quella che dà significato all'espressione «raggio *R »).* Ma questa definizione è quella relativa ai modi di vibrazione - cioè alle configurazioni di stringhe non arrotolate. In base a questa definizione di distanza - e soltanto a questa - le configurazioni di stringhe arrotolate sembrano tendersi attorno alla componente circolare dello spazio. Tuttavia, in base alla seconda definizione di distanza, quella che tiene conto dei modi di avvolgimento, questi sono in tutto e per tutto altrettanto localizzati nello spazio quanto lo sono i modi di vibrazione dal punto di vista della prima definizione di distanza, e il raggio che «vedono» è *1/R,* com'è spiegato nel testo.
Questa descrizione ci aiuta a capire perché stringhe arrotolate e non arrotolate misurano distanze che sono inversamente proporzionali le une alle altre. Poiché la questione è piuttosto sottile, vale forse la pena di analizzare i dettagli tecnici per i lettori che hanno una qualche propensione al ragionamento matematico. Nella meccanica quantistica delle particelle puntiformi la distanza e la quantità di moto (sostanzialmente l'energia) sono legate da una trasformata di Fourier. Precisamente, un autostato di posizione $|x\rangle$ su una circonferenza di raggio *R si* può definire mediante la formula $|x\rangle = \sum_v e^{ixp}|p\rangle$, dove $p = v/R$ e $|p\rangle$ è un autostato di quantità di moto (l'analogo di ciò che abbiamo chiamato modo di vibrazione uniforme di una stringa, vale a dire un moto senza cambiamenti di forma). Nella teoria delle stringhe esiste un'altra nozione di autostato di posizione, $|\tilde{x}\rangle$, che si definisce ricorrendo agli stati di avvolgimento: $|\tilde{x}\rangle = \sum_w e^{iwx}|\tilde{p}\rangle$, dove $|\tilde{p}\rangle$ è un autostato di avvolgimento con $\tilde{p} = wR$. Da queste definizioni vediamo immediatamente che *x* è periodico di periodo $2\pi R$, mentre $\tilde{x}$ è periodico di periodo $2\pi/R$, il che dimostra che *x* è una coordinata di posizione su una circonferenza di raggio *R,* mentre $\tilde{x}$ è una coordinata di posizione su una circonferenza di raggio *1/R.* In maniera ancora piú esplicita, possiamo ora immaginare di prendere i due pacchetti d'onda $|x\rangle$ e $|\tilde{x}\rangle$, farli partire entrambi, poniamo, dall'origine e seguire la loro evoluzione temporale allo scopo di eseguire la nostra procedura operativa per definire la distanza. La misura del raggio della circonferenza fornita dai due oggetti di prova è proporzionale all'intervallo di tempo necessario affinché i pacchetti d'onda ritornino nella loro configurazione iniziale. Dato che uno stato avente energia E evolve con un fattore di fase ove compare Et, possiamo dedurre che questo intervallo di tempo, e dunque il raggio, è $t \sim 1/E \sim R$ per i modi di vibrazione e $t \sim 1/E \sim 1/R$ per i modi di avvolgimento.

Ma se è vero che la teoria delle stringhe descrive il nostro universo, come si spiega che nella vita di ogni giorno o nelle nostre attività scientifiche non ci capita mai di imbatterci in due diverse nozioni di distanza? Parliamo sempre di distanza riferendoci a un unico concetto di questo genere, cosí come ci indica la nostra esperienza, che non ci offre alcun indizio dell'esistenza di un qualche altro concetto di distanza. Perché non riusciamo a cogliere la seconda possibilità prevista dalla teoria delle stringhe? La risposta sta nel fatto che, quando *R* (e dunque anche *1/R)* è significativamente diverso dal valore 1 (il che significa, ricordiamolo ancora, 1 moltiplicato per la costante di Planck) una delle nostre definizioni operative si rivela estremamente difficile da applicare, mentre l'altra si rivela estremamente facile da applicare. In sostanza, gli esseri umani hanno sempre eseguito le misure di distanza nel modo facile, restando all'oscuro dell'esistenza di una seconda possibilità.

Il fatto che una delle due procedure di misura sia molto piú difficile da mettere in pratica rispetto all'altra è dovuto alla

differenza di massa tra gli oggetti di prova - stringhe ad alta energia di avvolgimento/bassa energia di vibrazione e viceversa - quando il raggio R (e dunque anche *1/R)* si discosta significativamente dalla lunghezza di Planck (cioè dal valore *R = 1)*. In questo caso la configurazione ad «alta» energia corrisponde a oggetti di prova incredibilmente massivi - miliardi e miliardi di volte piú pesanti del protone, per esempio - mentre la configurazione a «bassa» energia corrisponde a masse di prova di pochissimo superiori a zero. Sussiste perciò un'enorme differenza tra le due procedure di misura, dato che il solo fatto di produrre configurazioni di stringa pesanti è un'impresa ancora molto al di là delle nostre capacità tecnologiche. Di conseguenza, soltanto la definizione di distanza basata sulle configurazioni di stringa piú leggere è tecnologicamente realizzabile ed è quella da noi implicitamente usata, fino a questo punto, tutte le volte che abbiamo parlato di «distanza». E questa la definizione che modella la nostra intuizione.

Tralasciando gli aspetti meramente pratici, in un universo governato dalla teoria delle stringhe siamo liberi di misurare le distanze usando l'una o l'altra definizione operativa. Gli astronomi misurano la «dimensione dell'universo» esaminando fotoni, che dopo avere attraversato gli spazi cosmici vanno a finire dentro i loro telescopi. In questo caso i fotoni sono i modi di stringa leggeri e il risultato che si ottiene è pari a circa 1061 x la lunghezza di Planck, come abbiamo già detto. Supponendo che le tre dimensioni spaziali ordinarie siano in realtà circolari, e che la teoria delle stringhe sia corretta, gli astronomi - servendosi di apparecchiature del tutto diverse (e oggi come oggi inesistenti) - dovrebbero essere in grado di misurare le immensità celesti mediante modi di stringa pesanti, ottenendo una misura che è l'inverso di questa enorme distanza. In questo senso è equivalente pensare che l'universo sia vastissimo, come siamo abituati a credere, oppure piccolissimo. I modi di stringa leggeri ci mostrano un universo grande e in espansione; i modi di stringa pesanti, al contrario, mettono in evidenza un universo minuscolo che si contrae. In tutto questo non c'è nessuna contraddizione: ci troviamo di fronte a due definizioni di distanza, diverse, ma egualmente sensate. La prima ci è maggiormente familiare soltanto a causa delle nostre limitazioni tecnologiche; entrambe, però, sono ugualmente valide.

Possiamo ora rispondere a un'altra domanda: in che modo gli esseri umani possono «entrare » in un universo talmente microscopico. Anche quando misuriamo la statura di una persona non possiamo far altro che usare i modi di stringa leggeri. Per confrontare il risultato di questa misura con la dimensione dell'universo dobbiamo impiegare la stessa procedura: troviamo in tal modo una misura di 15 miliardi di anni luce, che sono molti, molti di piú di un metro e ottanta. Domandarsi come l'universo « in formato ridotto » possa contenere al suo interno un essere umano in carne ed ossa è privo di senso, è come confrontare pere con banane. Dato che abbiamo due nozioni di distanza - definite usando stringhe di prova leggere o pesanti - dobbiamo confrontare tra loro soltanto misure ottenute nello stesso modo.

9. La dimensione minima.

E stata una bella sfacchinata, ma eccoci pronti ad affrontare il punto cruciale. Se adottiamo il «modo facile » di misurare le distanze - cioè usando i modi stringa piú leggeri invece di quelli pesanti - i risultati ottenuti saranno sempre maggiori della lunghezza di Planck. Per convincerci di questo fatto, proviamo ad analizzare nei dettagli l'ipotetico big crunch per le tre dimensioni estese, nell'ipotesi che queste siano circolari. Per rendere piú chiaro il ragionamento, supponiamo che all'inizio del nostro esperimento mentale i modi di stringa non arrotolata siano quelli leggeri e che il raggio dell'universo - misurato usando questi modi - risulti essere immensamente maggiore della lunghezza di Planck e in contrazione. Via via che la lunghezza del raggio diminuisce, i modi non arrotolati diventano sempre piú pesanti mentre quelli di avvolgimento diventano sempre piú leggeri. Quando il raggio raggiunge la lunghezza di Planck, cioè assume valore pari a 1, i modi di avvolgimento e i modi di vibrazione hanno masse dello stesso ordine di grandezza. Le due procedure sperimentali per misurare le distanze diventano a questo punto ugualmente difficili da effettuare e conducono entrambe allo stesso risultato, dato che 1 è l'inverso di se stesso.

Quando il raggio diminuisce al di sotto del valore 1, i modi di avvolgimento diventano piú leggeri dei modi di vibrazione. Dato che noi abbiamo deciso di scegliere sempre la procedura di misura piú facile, useremo questi modi per determinare le distanze e otterremo un valore del raggio uguale all'inverso di quello misurato mediante i modi di vibrazione: di conseguenza, il raggio risulterà essere maggiore della lunghezza di Planck e in espansione al trascorrere del tempo. Tutto ciò dipende semplicemente dal fatto che, mentre *R - la* quantità misurata usando i modi di stringa non arrotolata - si contrae scendendo al di sotto del valore 1 e diventando sempre piú *piccolo, 1/R* invece si espande oltrepassando il valore 1 e diventando sempre piú grande. In conclusione, se badiamo a usare sempre i modi di stringa piú leggeri - ossia il sistema piú facile di misurare le distanze - il valore minimo che potremo ottenere è uguale alla distanza di

Planck.

In particolare, è escluso che possa prodursi un big crunch, un collasso cosmico che riduca a zero le dimensioni dell'universo, dato che la misura del raggio, determinata usando come oggetti di prova stringhe «leggere», è sempre maggiore della lunghezza di Planck. Invece di contrarsi fino alla lunghezza di Planck e di rimpicciolirsi sempre di piú, il raggio dell'universo - se misurato con i modi di stringa piú leggeri - decresce fino alla lunghezza di Planck e inizia subito ad aumentare di nuovo. Non osserviamo piú una progressiva e ineluttabile implosione ma una specie di colossale rimbalzo.

Usare i modi di stringa leggeri per misurare le distanze è in accordo con la nostra nozione convenzionale di lunghezza - quella impiegata da tempo immemorabile, ben prima che si scoprisse la teoria delle stringhe. L'esistenza di violente fluttuazioni quantistiche - come abbiamo visto nel capitolo V - fa sí che questa nozione ordinaria di distanza ci ponga di fronte a problemi insormontabili, se entrano in gioco distanze al di sotto della lunghezza di Planck. Adottando questa prospettiva complementare, la teoria delle stringhe esclude la possibilità stessa di distanze ultramicroscopiche. Nella teoria fisica della relatività generale e nella corrispondente teoria matematica della geometria riemanniana esiste un unico concetto di distanza, la quale può assumere valori arbitrariamente piccoli. La teoria delle stringhe e, in ambito matematico, la nascente geometria quantica definiscono invece due diverse nozioni di distanza. Sfruttando l'una e l'altra in maniera accorta, riusciamo a determinare un concetto di distanza che su scala macroscopica è conforme alla nostra intuizione e alla relatività generale, mentre è totalmente discordante su scala microscopica. In particolare, questa nozione di distanza rende inaccessibili distanze che siano al di sotto della scala di Planck.

Vogliamo sottolineare ancora una volta un aspetto cruciale e piuttosto sottile del nostro ragionamento. Se decidessimo di ricusare la distinzione tra procedure di misura «facili» e «difficili» e ci ostinassimo, poniamo, a usare i modi di vibrazione per misurare le distanze anche quando il raggio *R* diventa piú corto della lunghezza di Planck, si potrebbe avere l'impressione di riuscire davvero in questo modo a trovare distanze minori della lunghezza di Planck. Ma la lunga discussione precedente ci ha insegnato che dobbiamo interpretare con molta cautela la parola «distanza» nell'ultima frase, dato che questa può avere due diversi significati, uno solo dei quali conforme alla nostra nozione tradizionale. E se continuiamo a usare stringhe non arrotolate (benché queste siano ormai diventate piú pesanti delle stringhe arrotolate) anche quando *R* è minore della lunghezza di Planck, significa che stiamo adottando la procedura «difficile» e che il corrispondente significato di «distanza » non è in accordo con l'uso comune. Ma non si tratta di una semplice questione semantica e nemmeno di una faccenda di comodità o di realizzabilità pratica di misure. Anche se scegliessimo di utilizzare la nozione non ordinaria di distanza e ottenessimo quindi una misura del raggio minore della distanza di Planck, la *fisica* non cambierebbe -come abbiamo mostrato nei paragrafi precedenti - e rimarrebbe identica a quella di un universo il cui raggio, nel consueto senso di distanza, è maggiore della lunghezza di Planck (come è comprovato, ad esempio, dall'esatta corrispondenza delle due tabelle 10.1 e 10.2). E ciò che importa è la fisica, non il linguaggio.

Brandenberger, Vafa e altri fisici hanno elaborato queste idee, suggerendo una riformulazione delle leggi della cosmologia, nella quale sia il big bang sia l'eventuale big crunch non richiedono un universo di raggio uguale a zero, bensì un universo le cui dimensioni abbiano tutte lo stesso ordine di grandezza della lunghezza di Planck. Una simile proposta è senza dubbio molto allettante, in quanto eliminerebbe tutti i dilemmi matematici, fisici e logici creati da un universo che si riduce a un punto infinitamente denso. Per quanto possa essere concettualmente difficile immaginare l'intero universo schiacciato in un minuscolo granello della dimensione di Planck, è davvero inconcepibile che esso possa comprimersi fino a diventare un punto privo di dimensione. La cosmologia fondata sulla teoria delle stringhe, di cui parleremo nel capitolo XIV, è ancora ai suoi primi passi, ma molto promettente, perché potrebbe offrirci un'alternativa piú accettabile del modello cosmologico standard.

10. E' una conclusione che vale in generale?

Ma che cosa succede se le dimensioni spaziali non sono circolari? Sono ancora valide le nostre conclusioni a proposito dell'esistenza di una lunghezza spaziale minima nella teoria delle stringhe? Nessuno lo sa con certezza. La caratteristica essenziale delle dimensioni circolari è che rendono possibile l'esistenza di stringhe arrotolate. Se dunque le stringhe si possono avvolgere attorno alle dimensioni spaziali, a prescindere dalla forma globale dello spazio che esse generano, la maggior parte delle conclusioni che abbiamo dedotto continuano a valere. Ma cosa si può dire, ad esempio, se due dimensioni appartengono a uno spazio a forma di sfera? In questo caso, le stringhe non possono rimanere

«intrappolate» in una configurazione di avvolgimento, perché riescono sempre a «scivolare» sulla superficie della sfera, nello stesso modo in cui schizza via un elastico teso su un pallone da basket. E' ancora vero che la teoria delle stringhe fissa un limite minimo oltre il quale queste dimensioni non possono contrarsi?

Numerose ricerche sembrano indicare che la risposta a questo interrogativo vari a seconda che la contrazione riguardi una dimensione spaziale completa (come negli esempi considerati in questo capitolo) oppure un «pezzo» isolato di spazio (come studieremo nei capitoli XI e XIII). Quasi tutti i teorici delle stringhe sono convinti del fatto che, indipendentemente dalla forma dello spazio, esiste un'estensione limite minima, proprio come nel caso delle dimensioni circolari, ogniqualvolta facciamo contrarre una dimensione spaziale completa. Sarà un obiettivo importante della ricerca futura dimostrare la fondatezza di questa asserzione, che ha ripercussioni dirette su molti aspetti della teoria delle stringhe, incluse le sue implicazioni cosmologiche.

11. Simmetria speculare.

Con la sua teoria della relatività generale, Einstein creò un legame tra la fisica della gravità e la geometria dello spaziotempo. La teoria delle stringhe amplia e rafforza i nessi tra fisica e geometria, dato che le proprietà delle stringhe in vibrazione - le masse e le cariche che trasportano - sono determinate in larga misura dalle proprietà delle componenti compattificate dello spazio. Abbiamo appena mostrato però come la geometria quantica - che risulta dalla combinazione di geometria e fisica nella teoria delle stringhe - riservi in realtà alcune sorprese. Sia in relatività generale sia nella geometria «ordinaria» una circonferenza di raggio *R* e una di raggio *1/R* sono diverse, punto e basta. Invece, nella teoria delle stringhe può accadere che esse siano fisicamente indistinguibili. Potremmo avventurarci ancora oltre, cercando di generalizzare, e domandarci se per caso non esistano spazi di forma geometrica radicalmente differente che siano nondimeno indistinguibili dal punto di vista della teoria delle stringhe.

Lance Dixon dello Stanford Linear Accelerator Center, nel *1988,* fece un'osservazione cruciale a questo proposito, che venne successivamente ripresa e approfondita da Wolfgang Lerche del Cern, Cumrun Vafa e Nicholas Warner, allora presso il Massachussetts Institute of Technology. Sulle base di argomentazioni estetiche scaturite da considerazioni di simmetria, questi fisici avanzarono l'audace ipotesi che due diversi spazi di Calabi-Yau - gli spazi in cui si compattificano le dimensioni spaziali extra previste dalla teoria delle stringhe - potessero dar luogo alla stessa identica fisica.

Per cercare di capire come possa verificarsi una possibilità apparentemente cosí remota ricordiamoci che il numero di buchi nelle dimensioni Calabi-Yau determina il numero di famiglie in cui possono distribuirsi le vibrazioni di stringa. Questi buchi sono analoghi al buco di un toro o ai buchi che troviamo in una multiciambella, come mostrato nella figura 9.1. Ma qualsiasi figura bidimensionale sulla pagina stampata sarà sempre inadeguata a illustrare il fatto che uno spazio di C alabi-Yau può avere buchi di qualunque dimensione. Sebbene questi buchi siano difficili da immaginare, la matematica riesce a descriverli in maniera compiuta. Un punto essenziale è che il numero di famiglie di particelle che nascono dalle vibrazioni di stringa dipende soltanto dal numero totale dei buchi, non dal numero di buchi di ogni dimensione particolare (è questo il motivo per cui, nella discussione del capitolo IX, non ci siamo preoccupati di fare distinzioni tra i vari tipi di buchi). Immaginiamo, dunque, due spazi di Calabi-Yau il cui numero totale di buchi sia lo stesso, benché i rispettivi numeri di buchi di ogni singola dimensione siano diversi. Dal momento che il numero di buchi di una data dimensione non è lo stesso, i due spazi di Calabi-Yau hanno forma differente. Tuttavia, dato che il numero totale di buchi è lo stesso, entrambi danno luogo a universi fisici con lo *stesso numero di famiglie* di particelle. Naturalmente, questa è solamente *una* proprietà fisica; il fatto che tutte le proprietà fisiche dei due universi debbano coincidere è una condizione molto piú restrittiva. Ma l'esempio dovrebbe almeno spiegare qual è il senso della congettura di Dixon-Lerche-Vafa-Warner.

Nell'autunno del *1987* iniziai a lavorare al dipartimento di fisica di Harvard, avendo ottenuto una borsa di studio postdottorale, e il mio studio si trovava proprio a due passi da quello di Vafa. Siccome nella mia tesi di dottorato avevo studiato in dettaglio le proprietà fisiche e matematiche delle dimensioni compattificate su uno spazio di CalabiYau nella teoria delle stringhe, Vafa mi teneva costantemente aggiornato sugli sviluppi del suo lavoro in questo settore di ricerca. Quando un anno piú tardi, nell'autunno del *1988,* capitò nel mio studio e mi raccontò dell'idea che era venuta in mente a lui, Lerche e Warner, fui intrigato e scettico allo stesso tempo. Intrigato, perché mi rendevo conto che se la loro ipotesi fosse stata vera, avrebbe potuto aprire nuove prospettive di ricerca nella teoria delle stringhe; scettico, perché ero convinto che le congetture sono affascinanti, d'accordo, ma le proprietà assodate con certezza sono un altro paio di

maniche.

Nei mesi successivi mi capitò spesso di ripensare a quella congettura e, sinceramente, arrivai quasi quasi a convincermi che fosse falsa. In maniera del tutto imprevista, tuttavia, un progetto di ricerca, apparentemente scollegato, che avevo intrapreso in collaborazione con Ronen Plesser - a quell'epoca studente di dottorato a Harvard, ora professore al Weizmann Institute e alla Duke University - mi avrebbe fatto presto cambiare idea. Plesser e io eravamo interessati a sviluppare metodi per ottenere spazi di Calabi-Yau nuovi, sottoponendo a una serie di manipolazioni matematiche uno spazio di Calabi-Yau iniziale. Eravamo particolarmente attratti da una tecnica detta *orbifolding,* il cui studio era stato iniziato a metà degli anni ottanta da Dixon, Jeffrey Harvey, della University of Chicago, e Witten. Si tratta, grossomodo, di un procedimento - illustrato schematicamente nella figura 10.4 - mediante il quale si incollano l'uno con l'altro differenti punti appartenenti a uno spazio di Calabi-Yau iniziale, rispettando un insieme di regole matematiche che assicurano che il nuovo spazio cosí ottenuto sia ancora di Calabi-Yau. Poiché la matematica che sta dietro le manipolazioni mostrate nella figura 10.4 è molto ardua, i teorici delle stringhe avevano studiato dettagliatamente questa tecnica soltanto nel caso degli spazi di Calabi-Yau piú semplici, vale a dire quegli spazi che rappresentano l'analogo in dimensione superiore delle varie ciambelle nella figura 9.1. Plesser ed io ci rendemmo conto però che alcune nuove e belle idee di Doron Gepner (allora alla Princeton University) potevano costituire potenti strumenti teorici per applicare il metodo dell'orbifolding anche a spazi di Calabi-Yau piú ostici, come quello mostrato nella figura 8.9.

Dopo aver intensamente lavorato su questa idea per alcuni mesi, scoprimmo un risultato sorprendente. Incollando insieme particolari gruppi di punti nella giusta maniera, riuscivamo a costruire uno spazio di CalabiYau le cui differenze rispetto a quello di partenza erano davvero stupefacenti: il numero di buchi di dimensione dispari del nuovo spazio di Calabi-Yau era esattamente uguale al numero di buchi di dimensione pari dello spazio di Calabi originario. Ciò significa, in particolare, che il numero totale di buchi - e dunque il numero di famiglie di particelle - è lo stesso per entrambi gli spazi, i quali hanno tuttavia forma e struttura geometrica differenti, a causa dell'inversione pari-dispari. [5] Per il lettore esperto osserviamo che, piú precisamente, il numero di famiglie di vibrazioni di stringa è uguale a un mezzo del valore assoluto della caratteristica di Eulero della varietà di CalabiYau, come già menzionato nella nota A del capitolo IX. Questa quantità - in opportune ipotesi - è data dal valore assoluto della differenza tra *h* 2,1 e *h* 1,1 (gli *h* p,q Sono i numeri di Hodge della varietà). Sostanzialmente, *h* 2,1 conta il numero di 3 -cicli di omologia non banali (i «buchi tridimensionali»), mentre *h* 1,1 conta il numero di 2-cicli di omologia (i «buchi bidimensionali»). Di conseguenza, mentre nel testo parliamo del numero totale di buchi, un'analisi piú accurata mostra che il numero di famiglie dipende dal valore assoluto della differenza tra il numero di buchi di dimensioni pari e quelli di dimensione dispari. La conclusione rimane comunque la stessa. Per esempio, se due varietà di Calabi-Yau differiscono soltanto per lo scambio dei numeri di Hodge *h* 2,1 e *h* 1,1 , il numero di famiglie di particelle elementari non cambia.

Galvanizzati per l'evidente collegamento che avevamo stabilito con la congettura di Dixon-Lerche-Vafa-Warner, Plesser ed io ci buttammo a capofitto nel compito di risolvere quella che era la questione cruciale: oltre al numero di famiglie di particelle, i due differenti spazi di Calabi-Yau hanno anche tutte le altre proprietà fisiche uguali? Dopo un'accurata e difficile analisi matematica che ci impegnò ancora per un paio di mesi - nel corso dei quali ricevemmo preziosi suggerimenti e costante incoraggiamento da parte di Graham Ross (che era stato mio direttore di ricerca a Oxford) e dello stesso Vafa - Plesser ed io giungemmo alla conclusione che la risposta, incontrovertibile, era sí. Per ragioni matematiche che avevano a che fare con l'inversione pari-dispari, coniammo l'espressione di « varietà speculari » (mirror manifolds) per designare le coppie di spazi di Calabi-Yau che sono fisicamente equivalenti, benché matematicamente distinti.[6] Il nome deriva dal fatto che i diamanti di Hocige (la tabella a forma di rombo che elenca tutti i numeri di Hodge) di due varietà di Calabi-Yau speculari si ottengono l'uno dall'altro per riflessione speculare.

I due spazi di una coppia di varietà di Calabi-Yau non sono l'immagine speculare l'uno dell'altro nel senso ordinario del termine. Ma nonostante abbiano proprietà geometriche differenti, danno origine allo stesso e identico universo se li usiamo per compattificare le dimensioni extra della teoria delle stringhe.

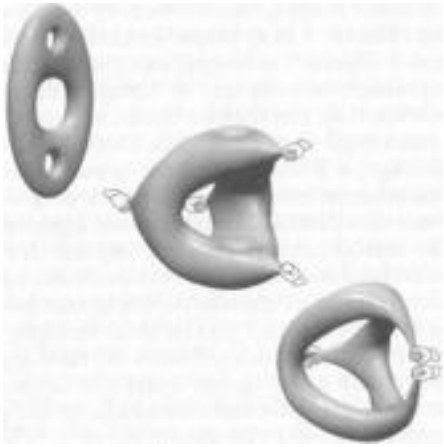

Figura 10 .4

Con il procedimento matematico detto *orbifolding si* produce un nuovo spazio di Calabi-Yau incollando tra loro vari punti di uno spazio di Calabi-Yau. iniziale.

Le settimane che seguirono quella scoperta furono per noi un periodo di grande ansia. Eravamo consapevoli di aver messo le mani su un nuovo, importante aspetto della fisica delle stringhe: avevamo mostrato che la stretta connessione tra geometria e fisica stabilita da Einstein veniva modificata in modo radicale: strutture geometriche profondamente diverse, che in relatività generale avrebbero implicato proprietà fisiche altrettanto diverse, davano luogo alla stessa fisica in teoria delle stringhe. E se invece avevamo fatto qualche sbaglio? Se la fisica dei due spazi di Calabi-Yau differiva per qualche minuto dettaglio che ci era sfuggito? Quando mostrammo i nostri risultati a Yau, per esempio, questi dichiarò, gentilmente ma con molta fermezza, che dovevamo certamente aver commesso qualche errore: da un punto di vista matematico - affermò - i nostri risultati erano troppo sbalorditivi per essere veri. Il giudizio di Yau ci obbligò a una pausa di ripensamento critico. Prendere un granchio in qualche affermazione marginale o di poco conto non è un dramma, ma il nostro risultato costituiva un inatteso passo avanti in una nuova direzione e avrebbe certamente innescato una forte reazione. Se ci fossimo sbagliati, lo avrebbero saputo tutti.

Alla fine, dopo aver controllato piú e piú volte i risultati ottenuti, la fiducia in noi stessi si rafforzò e ci decidemmo a inviare l'articolo a una rivista. Pochi giorni dopo, mi trovavo nel mio studio a Harvard e squillò il telefono. Era Philip Candelas, della University of Texas, che subito mi chiese se ero seduto. Sí, ero seduto. Mi annunciò che lui e due suoi studenti, Monika Lynker e Rolf Schimmrigk, avevano scoperto qualcosa che mi avrebbe scaraventato giú dalla sedia. Esaminando una vasta famiglia di spazi di Calabi-Yau che avevano generato al computer, si erano accorti che quasi tutti si distribuivano a coppie, in cui ciascuno spazio differiva dall'altro esattamente per lo scambio del numero di buchi di dimensione pari e di dimensione dispari. Gli dissi che ero ancora seduto sulla mia sedia: Plesser ed io avevamo scoperto lo stesso risultato. Il lavoro di Candelas e il nostro si completavano a vicenda: noi avevamo fatto un passo avanti provando che due varietà di Calabi-Yau speculari determinavano la stessa fisica, mentre Candelas e i suoi studenti avevano mostrato che un campione abbastanza significativo di spazi di Calabi-Yau si distribuivano in coppie speculari. Insieme, con i nostri due articoli, avevamo scoperto la simmetria speculare (mirror symmetry) della teoria delle stringhe.[7] Il termine "*mirror symme*" è usato anche in contesti fisici del tutto diversi (per esempio, a proposito della chiralità dell'universo, un problema cui abbiamo accennato nella nota *7* del capitolo VIII).

12. La fisica e la matematica della simmetria speculare.

Uno dei sorprendenti mutamenti di paradigma dovuto alla teoria delle stringhe sta nel fatto di aver allentato quella rigida e univoca associazione tra la geometria dello spazio e la fisica osservata. Ma queste nuove scoperte hanno implicazioni che vanno ben oltre gli aspetti filosofici. La simmetria speculare, in particolare, costituisce uno strumento assai potente per capire meglio sia la fisica delle stringhe sia la matematica degli spazi di Calabi-Yau.

Già molti anni prima che la teoria delle stringhe fosse scoperta, gli spazi di Calabi-Yau erano oggetto di studio da

parte di matematici attivi in un settore della ricerca chiamato «geometria algebrica». Senza avere il minimo sospetto della future applicazioni fisiche, per ragioni puramente inerenti alla matematica, questi studiosi erano riusciti a caratterizzare nei dettagli molte proprietà di questi spazi geometrici. Alcuni aspetti della teoria degli spazi di Calabi-Yau, tuttavia, si erano rivelati per i matematici molto difficili da spiegare, anzi del tutto inestricabili. La scoperta della simmetria speculare ha cambiato profondamente questo scenario. In buona sostanza, la simmetria speculare asserisce che certi spazi di Calabi-Yau - che in precedenza non si riteneva avessero alcuna relazione tra loro - sono invece strettamente interconnessi dalla teoria delle stringhe. Ciò che li accomuna è l'identico universo fisico al quale entrambi danno origine, se scelti per incorporare le dimensioni spaziali extra previste dalla teoria. Questo nesso inaspettato fornisce un nuovo strumento d'indagine sia in fisica sia in matematica.

Supponete, per esempio, di essere impegnati a calcolare le proprietà fisiche - cioè le masse e le cariche delle particelle - relative a una qualche possibile scelta di spazio di Calabi-Yau per compattificare le dimensioni extra. A voi non interessa in modo particolare che i vostri risultati trovino un riscontro sperimentale, dato che una miriade di ostacoli teorici e tecnologici rendono attualmente molto difficile questa verifica. Vi sta a cuore piuttosto di effettuare un esperimento mentale con lo scopo di mostrare come sarebbe il mondo se un certo particolare spazio di CalabiYau fosse scelto. Per un po' tutto fila liscio, ma a un certo punto, nel bel mezzo del vostro lavoro, vi imbattete in un calcolo matematico di insormontabile difficoltà. Nessuno, nemmeno i piú esperti matematici del mondo, sono in grado di dirvi come andare avanti. Vi siete arenati. Ma quello spazio di Calabi-Yau - vi ricordate - ha un suo partner speculare. Dato che la fisica delle stringhe associata a ogni spazio di una coppia speculare è identica, è chiaramente possibile fare tutti i calcoli usando l'altro spazio di Calabi-Yau. Di primo acchito potreste credere che il calcolo cosí riformulato si rivelerà altrettanto difficile del calcolo di partenza. Ecco invece che vi attende una piacevole sorpresa: nonostante il risultato debba rimanere lo stesso, scoprite che la forma specifica dei calcoli è molto diversa, e che in taluni casi il calcolo terribilmente complicato che avete iniziato diventa estremamente semplice una volta riformulato sullo spazio di Calabi-Yau. speculare. Anche se non c'è una spiegazione elementare del perché ciò accada, è assolutamente certo che -almeno per certi calcoli - le cose vanno proprio cosí, e il livello di difficoltà può diminuire in maniera davvero impressionante. La conseguenza è ovvia: potete continuare il vostro lavoro.

E' un po' come se qualcuno vi incaricasse di contare il numero esatto di arance che sono ammassate, cosí alla rinfusa, in un enorme cassone di 15 metri per lato e 3 metri di altezza. Cominciate a contarle ma ben presto vi rendete conto che il compito è piuttosto laborioso. Per fortuna, passa di lí un vostro amico, che era presente quando le arance furono scaricate. Vi dice che erano imballate in cassette molto piú piccole che, una volta impilate le une sulle altre, formavano una catasta lunga 20 cassette, larga 20 cassette e alta 20 cassette (e per puro caso ha con sé una di queste cassette). Avendo calcolato che in totale arrivarono 8000 cassette, non vi resta altro da sapere che il numero di arance contenute in ciascuna cassetta. Vi fate prestare la cassetta dal vostro amico, la riempite di arance e potete cosí portare a termine il vostro gravoso compito senza alcuno sforzo. Riorganizzando il conto in maniera intelligente, siete riusciti a renderlo notevolmente piú semplice.

Anche per i molti calcoli complicati della teoria delle stringhe la situazione non è diversa. Dato uno specifico spazio di Calabi-Yau, un calcolo può comportare un grandissimo numero di difficili passaggi matematici. Riformulando il problema sulla varietà speculare, tuttavia, si riesce a riorganizzare il calcolo molto piú efficacemente e lo si può portare a termine con relativa facilità. Questa osservazione, dovuta a Plesser e a me, è stata successivamente messa in pratica, con risultati davvero notevoli, da Candelas in collaborazione con Xenia de la Ossa e Linda Parker, ambedue della University of Texas, e Paul Green, della University of Maryland, i quali hanno mostrato che si potevano eseguire calcoli di quasi inimmaginabile difficoltà sfruttando l'idea della simmetria speculare, con poche pagine di algebra e un modesto computer.

Questi risultati hanno suscitato un vivissimo interesse tra i matematici, poiché alcuni di quei calcoli li tenevano in scacco da molti anni. La teoria delle stringhe -o almeno cosí proclamavano i fisici - era riuscita a tagliare il traguardo prima di loro.

Dovete tener presente che c'è una forte, per quanto amichevole, rivalità tra fisici e matematici. E come a volte capita, due matematici norvegesi - Geir Ellingsrud e Stein Arild Stromme - stavano proprio lavorando su uno dei molti calcoli che Candelas, de la Ossa e Parkes avevano espugnato con l'ausilio della simmetria speculare. In termini molto approssimativi, il problema era quello di calcolare il numero di sfere che possono essere «contenute» all'interno di un particolare spazio di Calabi-Yau, qualcosa di vagamente simile al conto delle arance contenute nel cassone. In un convegno

di fisici e matematici, svoltosi a Berkeley nel 1991, Candelas annunciò il risultato ottenuto dal suo gruppo usando la teoria delle stringhe e la simmetria speculare: 317 206 375. Anche Ellingsrud e Stromme annunciarono il risultato del loro difficilissimo calcolo matematico: 2 682 549 425. Matematici e fisici discussero per giorni: chi aveva ragione? La questione era ormai diventata la cartina di tornasole per mettere alla prova l'affidabilità quantitativa della teoria delle stringhe. Qualcuno commentava - con una punta di malizia - che non vi poteva essere test migliore di questo, una volta esclusa la possibilità di una verifica sperimentale della teoria delle stringhe. Oltretutto, i risultati ottenuti da Candelas e dal suo gruppo erano molto piú generali del singolo risultato numerico che Stromme e Ellingsrud sostenevano di aver calcolato e davano risposta a molti altri problemi cosí difficili che nessun matematico aveva mai nemmeno tentato di affrontarli. Ma si poteva avere fiducia nella teoria delle stringhe? Nonostante i fruttuosi scambi di idee tra matematici e fisici, il convegno si concluse senza che la controversia fosse risolta.

Circa un mese piú tardi, tra i partecipanti al convegno di Berkeley venne fatto circolare un messaggio di e-mail che annunciava: «La fisica ha vinto! » Ellingsrud e Stromme avevano trovato e corretto un errore nel loro programma, ottenendo un risultato che confermava quello di Candelas. Da quel giorno ormai lontano, la simmetria speculare è stata sottoposta a molte altre verifiche di carattere matematico, volte a mettere alla prova la sua attendibilità quantitativa, e le ha superate tutte a pieni voti. Anche in tempi recenti, circa un decennio dopo la scoperta della simmetria speculare da parte dei fisici, i matematici hanno compiuto un importante progresso svelando quali sono i suoi veri fondamenti geometrici. Avvalendosi anche dei risultati ricavati dai matematici Maxim Kontsevich, Yuri Manin, Gang Tian, Jun Li e Alexander Givental, Yau e i suoi collaboratori Bong Lian e Kefeng Liu hanno finalmente trovato una dimostrazione rigorosa delle formule usate per contare le sfere negli spazi di CalabiYau, risolvendo in tal modo una moltitudine di problemi sui quali i matematici si interrogavano da oltre un secolo.

Al di là dei dettagli di questo episodio particolare, tutta la storia mette in luce quale ruolo abbia cominciato a svolgere la fisica nei confronti della matematica contemporanea. Per un certo numero di anni, i fisici hanno scavato nella grande miniera della matematica, alla ricerca di strumenti per costruire e analizzare i modelli del mondo fisico. Dopo la scoperta della teoria delle stringhe, la fisica ha iniziato a ripagare il conto, fornendo ai matematici nuove potenti idee per affrontare i loro problemi ancora da risolvere. La teoria delle stringhe non solo offre alla fisica un quadro concettuale unificante, ma instaura anche legami profondi con la matematica.

Capitolo undicesimo
Lo spazio si strappa

Se continuate a tendere e tirare una membrana di gomma, prima o poi finirà per strapparsi. Questo semplice fenomeno ha indotto numerosi fisici a domandarsi se questo possa accadere anche per la trama geometrica che costituisce l'universo. In altre parole, lo spazio si può lacerare, o questa è un'idea fuorviante che nasce dal fatto di prendere troppo sul serio l'analogia con la membrana di gomma?

Secondo la relatività generale di Einstein, no, non è possibile che la trama geometrica dello spazio si strappi.[1] Il lettore provvisto di preparazione matematica capirà che la questione che ci stiamo ponendo è se la topologia dello spazio sia dinamica, cioè se possa cambiare. Anche se ci riferiremo spesso a cambiamenti dinamici di topologia, in pratica considereremo di solito una famiglia a un parametro di «spazitempi», la cui topologia cambia in funzione del parametro. Dal punto di vista tecnico, questo parametro non è il tempo, ma in opportuni limiti può essere sostanzialmente identificato con il tempo.

Le equazioni della relatività generale affondano le loro radici nella geometria riemanniana, e quest'ultima - come abbiamo già osservato nel capitolo precedente - descrive le distorsioni spaziali analizzando le relazioni metriche tra punti vicini l'uno all'altro. Affinché abbia un senso parlare di queste relazioni metriche, il formalismo matematico richiede che lo spazio in esame sia liscio - un termine con un ben preciso significato tecnico, questo, la cui accezione comune però rende bene l'idea di fondo: non ci devono essere punte aguzze, pieghe spigolose, «punture», pezzi distinti «incastrati» gli uni negli altri, strappi di qualunque tipo. Se in una regione dello spazio comparissero irregolarità di questo genere, le equazioni della relatività generale andrebbero in frantumi e ciò sarebbe l'indizio inequivocabile di una qualche catastrofe cosmica, una fine apocalittica che il nostro universo cosí bene ordinato sembra evitare.

Tutto ciò non ha impedito ad alcuni fisici teorici, nel corso degli ultimi decenni, di speculare sulla possibilità che una nuova formulazione della fisica - in grado di superare la teoria classica di Einstein e di incorporare la meccanica quantistica - potrebbe dimostrare l'esistenza di buchi e strappi nella trama dello spazio. In effetti, dato che in meccanica quantistica si verificano intense fluttuazioni alla scala di Planck, qualcuno è giunto a ipotizzare che buchi e strappi potrebbero rappresentare una caratteristica microscopica assolutamente comune della struttura dello spazio. Il concetto di cunicolo *spaziotemporale (wormhole) - che* dovrebbe essere familiare a tutti gli appassionati di Star Trek - si basa appunto su tali elucubrazioni. L'idea è semplice: immaginate di essere il direttore del personale di una grossa società la cui sede è situata al novantesimo piano di una delle due torri del World Trade Center di New York. Per qualche strano capriccio connesso alla storia della società, un ufficio con cui prevedete di avere rapporti sempre piú stretti è situato al novantesimo piano dell'altra torre. Escludendo la possibilità di un trasloco, che sarebbe scomodo per entrambi, vi viene in mente una soluzione naturale: costruire un ponte da un ufficio all'altro, che unisca le due torri. Ciò permetterebbe agli impiegati di spostarsi liberamente tra i due settori senza bisogno di scendere e salire novanta piani.

Un cunicolo spaziotemporale assolve una funzione analoga: è un ponte, o se preferite un tunnel, che mette in collegamento, come una scorciatoia, due regioni dello spaziotempo. Usando un modello bidimensionale, supponiamo che l'universo abbia la forma mostrata nella figura 11.1. Se la direzione generale è situata nel circoletto piú in basso di 11.1a, potete raggiungere il vostro ufficio, situato nel circoletto piú in alto, soltanto percorrendo tutta la lunghezza del cammino a U, da un capo dell'universo all'altro. Ma se supponiamo che lo spazio possa strapparsi, iniziando a sfrangiarsi come mostrato nella figura 11.1 b, e se da queste frange possano «svilupparsi» dei tentacoli capaci di saldarsi come in 11.1 c, si

formerà un ponte nello spazio, che mette in collegamento immediato due regioni prima remotissime. Questo è un cunicolo spaziotemporale. Nonostante l'analogia con il ponte del World Trade Center, dobbiamo però tenere ben presente una differenza essenziale. Il ponte che unisce le due torri attraversa una regione di spazio già esis*tente: lo* spazio tra le due torri. Al contrario, il cunicolo crea una nuova regione di spazio, dato che - nel nostro esempio bidimensionale non c'è altro spazio all'infuori dello spazio incurvato a U nella figura 11.1(a). Il f atto che si vedano regioni che non appartengono a tale spazio riflette soltanto l'inadeguatezza dell'illustrazione, che raffigura l'universo a U come se fosse contenuto nel nostro universo, che ha un maggior numero di dimensioni. E' il cunicolo che crea una nuova porzione di spazio, aprendo una strada prima impossibile da percorrere.

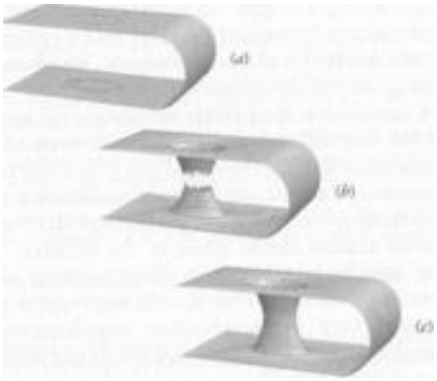

Figura 11.1.

(a) In un universo a forma di U l'unico modo per andare da un capo all'altro è. percorrere tutto la lunghezza del cammino. (b) La trama dello spazio si strappa e cominciano a formarsi le due estremità di un cunicolo spaziotemporale *[wormhole].* (c) Le due estremità del cunicolo spaziotemporale si fondono, formando un ponte - una scorciatoia - che collega le due regioni dell'universo.

Nell'universo esistono cunicoli spaziotemporali ? Nessuno lo sa. E se esistessero, non è affatto chiaro se essi potrebbero assumere solo una forma microscopica o arrivare a occupare vaste regioni di spazio (come in Star Trek). Comunque sia, per stabilire se questi cunicoli sono soltanto fantascienza oppure corrispondono a un fatto fisico, è essenziale chiarire se la trama dello spazio può strapparsi oppure no .

I buchi neri costituiscono un altro esempio notevole in cui la trama dello spazio è tesa all'estremo limite possibile. Nella figura 3.7 abbiamo visto che l'enorme campo gravitazionale di un buco nero produce una curvatura talmente grande che lo spazio sembra presentare una «puntura» o essere estremamente aguzzo nel centro del buco nero. Poiché, a differenza dei cunicoli spaziotemporali, l'esistenza dei buchi neri è suffragata da numerose evidenze sperimentali, domandarsi che cosa accada nel punto centrale di un buco nero è una questione genuinamente scientifica e non solo speculativa. Anche in questo caso, le condizioni limite che si producono in un buco nero fanno sí che le equazioni della relatività generale non siano piú valide. Alcuni fisici hanno avanzato l'ipotesi che, sebbene ci sia davvero una «puntura », l'orizzonte degli eventi del buco nero ci protegga da questa «singolarità cosmica», dato che è impossibile che qualcosa sfugga alla sua potentissima morsa gravitazionale. In base a questo ragionamento, Roger Penrose della Oxford University è giunto a ipotizzare una «censura cosmica», che consentirebbe l'esistenza di queste singolarità soltanto a condizione che rimangano nascoste dietro l'impenetrabile cortina di un orizzonte degli eventi. D'altro canto, prima della scoperta della teoria delle stringhe, alcuni fisici congetturavano che un'opportuna fusione di meccanica quantistica e relatività generale avrebbe mostrato che gli effetti quantistici eliminano - o per cosí dire, ricuciono - queste apparenti irregolarità dello spaziotempo.

Con la scoperta della teoria delle stringhe, che realizza un'armoniosa fusione di meccanica quantistica e relatività generale, siamo finalmente in condizione di affrontare tali problemi. Sebbene, a dire il vero, i teorici delle stringhe non siano ancora riusciti a trovare una risposta definitiva, alcuni problemi strettamente legati a questi sono stati effettivamente risolti nel corso degli ultimi anni. In questo capitolo, spiegheremo come la teoria delle stringhe dimostri, per la prima volta, che esistono circostanze fisiche - che non hanno niente a che vedere con i buchi neri o i cunicoli

spaziotemporali -nelle quali la trama dello spazio si può strappare.

1. Un'intrigante possibilità.

Nel 1987, Shing-Tung Yau e il suo studente Gang Tian, ora al Massachussets Institute of Technology, fecero un'interessante osservazione matematica. Servendosi di tecniche geometriche già note, scoprirono che era possibile trasformare certi spazi di Calabi-Yau in altri spazi di Calabi-Yau praticando una puntura sulla loro superficie e poi ricucendo il forellino secondo un ben preciso procedimento matematico.[2] Per coloro che hanno una buona preparazione matematica, diremo che nella costruzione di Yau e Tian si opera prima un blow *down* di curve razionali in una varietà di Calabi-Yau e poi si fa uso del fatto che, in opportune ipotesi, la singolarità cosí creata si può riparare con una successione di «piccole risoluzioni » (small *resolutions).*

In termini molto approssimativi, individuavano un tipo particolare di sfera bidimensionale - simile alla superficie di una palla - all'interno dello spazio di Calabi-Yau iniziale, come nella figura 11.2. (Una palla, al pari di tutti gli altri oggetti che ci circondano, è tridimensionale.

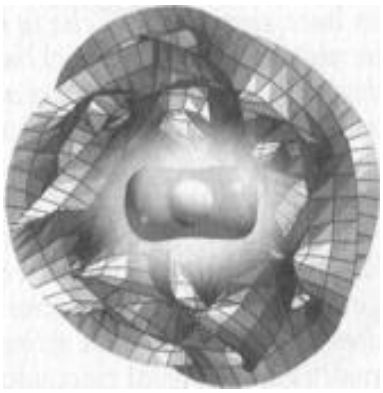

Figura 11. 2.
La regione evidenziata all'interno dello spazio di Calabi-Yau contiene una sfera.

Nel nostro caso, però, prendiamo in considerazione soltanto la superficie della palla, trascurando sia lo spessore del materiale di cui è fatta sia lo spazio racchiuso al suo interno. I punti sulla superficie della palla sono individuati da due numeri - la latitudine e la longitudine - nello stesso modo in cui si localizzano i punti sulla superficie terrestre. E per questo motivo che la superficie della palla, cosí come la superficie del tubo di gomma di cui abbiamo parlato nei capitoli precedenti, risulta essere bidimensionale). Passavano quindi a rimpicciolire la sfera fino a contrarla alle dimensioni di un punto, come mostra la serie di figure nella 11.3 . Questa figura e le successive sono state semplificate rappresentando soltanto la porzione di spazio che ci interessa, ma tutte queste trasformazioni di forma - non va dimenticato - avvengono all'interno di uno spazio di Calabi-Yau piú grande (fig. 11. 2). Tian e Yau procedevano infine a strappare delicatamente lo spazio di Calabi-Yau nella strozzatura prodotta (fig. *11.4a),* aprendolo e incollandovi un'altra sferetta (fig. *11.4b),* che gonfiavano fino a renderla bella pienotta (figg. *11.4c* e *d).* I matematici chiamano questa successione di operazioni un flop. Yau, Tian e altri notarono che in certi casi il nuovo spazio di Calabi-Yau prodotto da un flop (fig. *11.4d) è* topologicamente diverso da quello di partenza (fig. *11.3a*). Ciò significa, in parole povere, che *è* assolutamente impossibile ottenere lo spazio di Calabi-Yau finale deformando quello iniziale senza produrre strappi in qualche fase intermedia dell'operazione.

Figura 11.3.
Una sfera dentro uno spazio di Calabi-Yau viene rimpicciolita fino alle dimensioni di un punto, operando una sorta di strozzatura nello spazio. Questa figura e le successive sono semplificate, perché viene mostrata solo una parte

dell'intero spazio di Calabi-Yau.

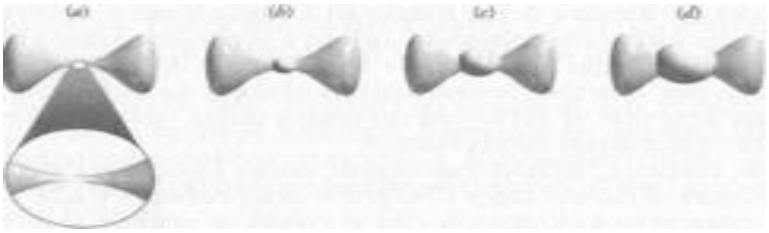

Figura 11.4.
Uno spazio di Calabi-Yau con una strozzatura *(pinched)* si strappa e produce una sfera che, gonfiandosi, rende nuovamente liscia la sua superficie. La sfera originaria della figura 11.33 ha subito un flop.

Da un punto di vista matematico, la costruzione di Yau e Tian è interessante perché consente di generare nuovi spazi di Calabi-Yau a partire da spazi già noti, ma le sue potenzialità teoriche emergono soprattutto in ambito fisico. Siamo infatti indotti a porci una domanda intrigante: è possibile che, oltre a essere un astratto procedimento matematico, la successione di trasformazioni rappresentata dalla figura 11.3a a quella 11.4*d si* verifichi realmente in natura? E possibile che, contrariamente alle previsioni di Einstein, la trama dello spazio si strappi e si ricucia nella maniera che abbiamo descritto?

2. La prospettiva speculare.

Negli anni immediatamente successivi al 1987, capitò di tanto in tanto che Yau mi incoraggiasse a pensare alle possibili incarnazioni fisiche delle transizioni attraverso flop descritte da lui e Tian. Non gli diedi retta. Mi sembrava che i flop fossero soltanto astrazioni matematiche, prive di qualsiasi relazione con la fisica delle stringhe. In effetti, sulla base del ragionamento sviluppato nel capitolo X, che dimostra che le dimensioni circolari hanno un raggio minimo, si sarebbe quasi tentati di dire che la teoria delle stringhe non permette che la sfera in figura 11.3 possa contrarsi fino alle dimensioni di un punto. Tuttavia, come già abbiamo osservato nel capitolo X, se *è* una porzione di spazio (in questo caso una sfera contenuta nella spazio di Calabi-Yau) a contrarsi e non una dimensione circolare completa, allora l'argomentazione che identifica raggi piccoli e raggi grandi cade in difetto. Ciò nonostante, anche se questa idea per scartare le transizioni attraverso flop non reggeva a un esame piú attento, il fatto che la trama dello spazio potesse strapparsi mi pareva alquanto improbabile.

Nel 1991, tuttavia, il fisico norvegese Andy Lùtken e Paul Aspinwall - mio compagno di dottorato a Oxford e ora professore alla Duke Universíty - si posero una domanda che si rivelò di grande interesse: se la porzione Calabi-Yau del nostro universo *è* sottoposta a una transizione attraverso flop, quali effetti si avranno sulla geometria dello spazio di CalabiYau. che *è il* suo partner speculare? Le motivazioni di questa domanda stanno nel fatto che la fisica associata a ciascuna varietà di Calabi-Yau di una coppia speculare - come ricorderete - è del tutto identica, benché la matematica cui un fisico teorico deve ricorrere per far emergere questa fisica possa essere notevolmente piú complicata in un caso piuttosto che nell'altro. Aspinwall e Lùtken congetturarono che il flop descritto nelle figure 11 .3 e 11.4, assai complesso dal punto di vista matematico, potesse avere una descrizione speculare molto piú semplice - una descrizione capace di evidenziare in modo piú perspicuo la fisica associata.

A quell'epoca la comprensione della simmetria speculare era ancora troppo lacunosa perché fosse possibile risolvere il problema posto da Aspinwall e Lùtken. Essi osservarono, comunque, che la descrizione in termini dello spazio di Calabi-Yau speculare non sembrava dare adito a nessuna conseguenza fisica disastrosa che potesse essere causata dagli «strappi» delle transizioni attraverso flop. In quegli stessi anni, i risultati ottenuti da Plesser e me nell'individuare coppie speculari di varietà di Calabi-Yau. (vedi il capitolo X) ci avevano inaspettatamente indotti a riflettere anche sui flop. E' infatti ben noto, in geometria algebrica, che il procedimento da noi usato per costruire coppie speculari - incollando insieme differenti punti di uno spazio di Calabi-Yau, come nella figura 10.4 - produce situazioni geometriche identiche a quelle che si ottengono operando mediante «punture» e « strozzature », come mostrato nelle figure 11.3 e 11.4. E dal punto di vista fisico, Plesser ed io non trovavamo alcuna ragione che giustificasse l'insorgere di catastrofi cosmiche associate alla nostra costruzione. Le osservazioni di Aspinwall e Lùtken (e anche un loro precedente articolo con Graham Ross) ci diedero inoltre l'idea che potevamo riparare matematicamente la «strozzatura» in due maniere diverse: una

produceva lo spazio di Calabi-Yau. della figura 11.3a, l'altra quello della figura 11.4d. Questo fatto ci portava a credere che il passaggio dall'una all'altra potesse effettivamente realizzarsi in natura.

Insomma, verso la fine del 1991 vi erano alcuni teorici delle stringhe, per quanto in numero ristretto, fortemente convinti del fatto che la trama dello spazio potesse strapparsi. Ma nessuno possedeva gli strumenti tecnici per accertare in modo definitivo o per confutare questa stupefacente ipotesi.

3. Avanzando a piccoli passi.

Nel corso del *1992,* seppure in maniera non continuativa, Plesser e io cercammo di dimostrare che lo spazio può trasformarsi attraverso flop che producono strappi nella sua struttura geometrica. Benché ì nostri calcoli fornissero svariate prove indiziarie a favore dell'ipotesi da provare, non riuscivamo a trovare una dimostrazione rigorosa e definitiva. In primavera, Plesser fece una conferenza all'Institute for Advanced Study di Princeton e, in privato, raccontò a Witten dei nostri tentativi di realizzare la matematica dei flop nell'ambito della teoria delle stringhe. Dopo aver sintetizzato le nostre idee, Plesser attese la reazione di Witten. Questi si allontanò dalla lavagna e si mise a guardare fuori dalla finestra del suo studio. Dopo un minuto di silenzio, forse due, Witten si volse indietro e disse a Plesser che se le nostre idee avessero funzionato, «sarebbe stato spettacolare ». Queste parole riaccesero il nostro entusiasmo. Ma dopo un po' di tempo, poiché non facevamo alcun progresso nonostante tutti i nostri sforzi, ciascuno dei due prese a lavorare su altri progetti di teoria delle stringhe.

Ciò nonostante, mi capitava spesso di rimuginare sulla possibilità fisica delle transizioni attraverso flop. Piú passava il tempo, piú mi convincevo che esse dovessero rientrare a pieno titolo nella teoria delle stringhe. I calcoli preliminari che avevo fatto insieme a Plesser - unitamente ad alcune illuminanti conversazioni con David Morrison, un matematico della Duke University - sembravano indicare che questa fosse l'unica conclusione coerente con le previsioni della teoria delle stringhe. In effetti, nel corso di un breve soggiorno a Duke, Morrison e io - avvalendoci anche di alcune preziose osservazioni di Sheldon Katz, un matematico della Oklahoma State University che stava trascorrendo un periodo di ricerca a Duke -delineammo una strategia per dimostrare che nella teoria delle stringhe possono verificarsi transizioni attraverso flop. Ma quando ci mettemmo a tavolino per fare i calcoli necessari, scoprimmo che erano incredibilmente laboriosi. Anche il computer piú veloce del mondo avrebbe impiegato piú di un secolo per completarli. Avevamo fatto un passo avanti, certo, ma ci occorreva una nuova idea, che potesse rendere molto piú efficiente il nostro metodo di calcolo. A svelare questa idea fu, inconsapevolmente, Victor Batyrev, un matematico dell'Università di Essen, in due articoli che circolarono nella primavera e nell'estate del *1992.*

L'interesse di Batyrev per la simmetria speculare era motivato soprattutto dal successo ottenuto da Candelas e collaboratori nel risolvere il problema del conteggio delle sfere in uno spazio di Calabi-Yau (vedi fine del capitolo X). Con la sua impostazione da matematico, tuttavia, Batyrev era piuttosto disorientato dai metodi seguiti da Plesser e me per determinare coppie speculari di spazi di Calabi-Yau. Sebbene gli strumenti da noi usati fossero del tutto normali nella teoria delle stringhe, Batyrev mi confessò, in seguito, che il nostro articolo gli era sembrato vera e propria «magia nera». Questo episodio è rivelatore del profondo iato (incontro di due vocali che non formano dittongo, né si elidono) culturale che separa fisica e matematica e siccome la teoria delle stringhe lambisce i confini di entrambe queste discipline, le differenze di linguaggio, metodi e stile divengono tanto piú evidenti. I fisici si possono paragonare a musicisti di avanguardia, che tendono a infrangere i canoni tradizionali e a rasentare i limiti dell'ammissibile in cerca di nuove soluzioni. I matematici invece, somigliano a musicisti classici, che solitamente lavorano con regole molto piú rigide e sono disposti ad andare avanti solo dopo aver verificato con il dovuto rigore la correttezza di tutti i passi precedenti. Ciascuno stile ha i suoi vantaggi e svantaggi; ciascuno è un impareggiabile modo di espressione per la scoperta creativa. Come per la musica classica e moderna non si può dire che uno sia giusto e l'altro sbagliato: i metodi che ognuno di noi usa sono in larga misura una questione di gusto e di formazione culturale.

Batyrev si prefiggeva di riformulare la costruzione di spazi di Calabi-Yau speculari in un quadro matematico piú convenzionale, e riuscì nel suo intento. Basandosi su alcuni precedenti risultati di Shi-Shyr Roan, un matematico di Taiwan, scoprì un procedimento matematico per generare coppie di spazi di Calabi-Yau speculari. La sua costruzione si riduce a quella che Plesser e io avevamo determinato nei casi da noi studiati, ma è piú generale ed enunciata in un linguaggio piú familiare ai matematici.

Il rovescio della medaglia stava nel fatto che gli articoli di Batyrev si rifacevano ad aree della matematica che erano per lo piú sconosciute alla maggior parte dei fisici. Personalmente, ad esempio, pur essendo in grado di capire il succo dei suoi ragionamenti, avevo grandi difficoltà ad afferrare molti dettagli importanti. Una cosa comunque era chiara: i metodi delineati da Batyrev, se interpretati e applicati nel modo giusto, indicavano una nuova strategia per affrontare la questione dei flop e dei possibili «strappi» nella trama dello spazio.

Sul finire dell'estate del *1992,* galvanizzato da questi sviluppi, decisi di immergermi di nuovo nel problema dei flop con tutte le mie energie e senza distrazioni. Ero già a conoscenza del fatto che Morrison avrebbe trascorso un anno sabbatico all'Institute for Advanced Study e venni a sapere che anche Aspinwall sarebbe stato lì, con una borsa postdottorale. Con qualche telefonata e qualche scambio di e-mail, organizzai le cose per poter trascorrere anch'io l'autunno successivo all'Institute, prendendo un periodo di congedo dalla Cornell University.

4. Si delinea una strategia.

Sarebbe davvero difficile immaginare un posto piú adatto a lunghe ore di intensa concentrazione di quanto non sia l'Institute for Advanced Study. Fondato nel *1930,* è immerso nel verde di prati dolcemente ondulati, al margine di un bosco idilliaco, a pochi chilometri di distanza dal campus della Princeton University. E' impossibile, si dice, essere distratti, all'Institute, dal proprio lavoro, semplicemente perché non esistono distrazioni.

Dopo aver abbandonato la Germania, Einstein entrò a far parte dell'Institute nel *1933* e vi rimase fino alla fine dei suoi giorni. Non ci vuole molta fantasia per immaginarselo mentre medita sulla teoria di campo unificato nel silenzio quasi ascetico del paesaggio circostante. L'atmosfera è impregnata di questa nobile tradizione di pensiero, il che può risultare eccitante od opprimente, a seconda dello stato di avanzamento del vostro lavoro.

Poco dopo il mio arrivo all'Institute, Aspinwall ed io stavano percorrendo Nassau Street (la principale via commerciale della città di Princeton) cercando di metterci d'accordo su dove andare a cenare. Un compito non facile, dato che Paul è tanto amante della carne quanto io sono rigorosamente vegetariano. Mentre eravamo intenti a raccontarci l'un l'altro le ultime novità delle nostre vite, Paul mi chiese se avevo in mente qualche nuova idea su cui lavorare. Gli risposi di sí, e gli raccontai quanto ritenessi importante dimostrare che l'universo, se la teoria delle stringhe aveva ragione, poteva subire trasformazioni, come i flop, tali da produrre strappi nella sua trama spaziale. Gli descrissi brevemente quale strategia avevo scelto di adottare e insistetti sulla mia recente speranza che il lavoro di Batyrev ci avrebbe permesso di colmare le restanti lacune. Credevo che Paul mi avrebbe capito al volo e che sarebbe stato immediatamente contagiato dal mio entusiasmo. Rimase invece impassibile. Ripensandoci ora, la sua freddezza era in larga misura dovuta a quell'atteggiamento di disfida intellettuale, comune tra di noi e mai dettato da ostilità, che ci spingeva a fare sempre l'avvocato del diavolo nei confronti delle idee dell'altro. Nel giro di qualche giorno si persuase delle mie ragioni e iniziammo a lavorare sui flop.

Era ormai arrivato anche Morrison, e ci ritrovammo tutti e tre nella *tea-room* dell'istituto per mettere a punto una possibile strategia. Fummo subito d'accordo nell'individuare l'obiettivo primario: stabilire se la transizione dalla figura 11.*3a* alla 11.4*d* potesse effettivamente verificarsi in natura. Ma un attacco frontale al problema era fuori discussione, poiché le equazioni che descrivono questa transizione sono estremamente difficili, soprattutto quando entrano in gioco gli «strappi » dello spazio. Decidemmo dunque di riformulare la questione usando la simmetria speculare, sperando che in tal modo le equazioni sarebbero diventate piú abbordabili La figura 11.5 illustra schematicamente la nostra idea: in alto è rappresentata l'evoluzione (dalla figura 11.*3a* alla *11.4d)* dello spazio di Calabi-Yau originario, in basso la stessa evoluzione è descritta nella prospettiva dello spazio di Calabi-Yau che è suo partner speculare. Come molti di noi avevano già compreso, in questa riformulazione (speculare) la fisica delle stringhe non presenta alcuna patologia, né va incontro ad alcun evento catastrofico. Come potete vedere, non sembra prodursi infatti nessuna «strozzatura» e nessuno «strappo» nella successione di spazi raffigurati nella seconda riga della figura 11.5. Dal nostro punto di vista, tuttavia, l'interrogativo fondamentale che sollevava questa osservazione era il seguente: spingevamo la simmetria speculare oltre i suoi limiti di applicabilità? Sebbene gli spazi di Calabi-Yau. raffigurati all'estrema sinistra della prima e della seconda riga della figura 11.5 generino la stessa fisica, è vero che a ogni stadio della loro trasformazione - che passa necessariamente per la fase centrale di strappo e ricucitura - le proprietà fisiche rimangono identiche sia nella descrizione originaria sia in quella

speculare?

Quantunque avessimo ottime ragioni per credere che la relazione di simmetria speculare rimanesse sicuramente valida per la sequenza di spazi che arriva fino allo «strappo» rappresentato nella prima riga della figura 11.5, nessuno poteva sapere se le due serie di spazi di Calabi-Yau della figura 11.5 continuassero a rimanere speculari anche dopo lo « strappo». Questo era il punto cruciale di tutta la faccenda, perché, in caso affermativo, l'assenza di eventi catastrofici nella descrizione specularmente simmetrica avrebbe implicato che questa stessa assenza valeva anche per gli spazi di Calabi-Yau originari, e noi saremmo cosí riusciti a dimostrare che nella teoria delle stringhe lo spazio si può strappare. Ci era chiaro che il problema si poteva ridurre a un calcolo: ricavare le proprietà fisiche dell'universo per lo spazio di Calabi-Yau dopo lo strappo (usando, cioè, lo spazio raffigurato all'estrema destra della prima riga della figura 11.5) e per il supposto partner speculare (lo spazio, cioè, all'estrema destra della seconda riga della figura 11.5) e vedere se sono identiche.

Su questo calcolo, Aspinwall, Morrison ed io concentrammo tutte le nostre energie nell'autunno del 1992.

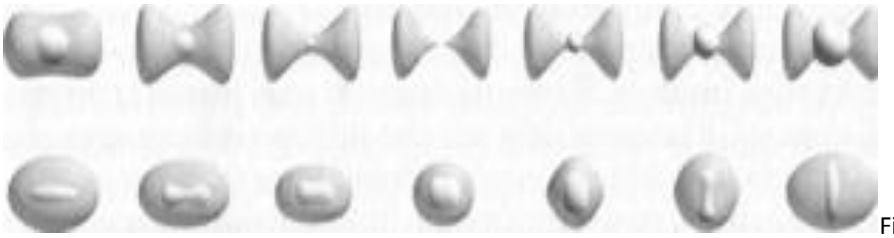
Figura 11. 5.
Una transizione con cambiamento di topologia attraverso un flop (prima riga). La sua riformulazione in termini della simmetria speculare (seconda riga).

5. Si studia fino alle ore piccole.

L'acuminata intelligenza di Edward Witten si manifesta sotto le sembianze di un contegno garbatamente ironico, a volte quasi sarcastico. Molti lo considerano il successore di Einstein nel ruolo di piú grande fisico vivente. Altri si spingono oltre e vedono in lui addirittura il piú grande fisico di tutti i tempi. Il suo interesse per i problemi di punta della fisica è insaziabile e le sue idee esercitano un'influenza cruciale nel determinare le linee guida della ricerca nella teoria delle stringhe.

La produttività di Witten è leggendaria per la sua ampiezza e profondità teorica. La moglie, Chiara Nappi - che lavora anche lei come fisico all'Institute - lo descrive mentre è assorto a esplorare mentalmente, seduto al tavolo di cucina, gli estremi confini della conoscenza nella teoria delle stringhe, senza alcuna necessità di usare carta e penna, se non di tanto in tanto per verificare qualche dettaglio particolarmente difficile.[3] K.C. Cole, in «New York Times Magazine», 18 ottobre 1987, p. 20.
Un'altra storia ci viene narrata da un giovane ricercatore che, per un'estate, si trovò a occupare uno studio accanto a quello di Witten. Mentre continuava a spremersi le meningi, alla sua scrivania, su interminabili calcoli di teoria delle stringhe, gli giungeva il continuo e frustrante controcanto del ritmico ticchettio della tastiera di Witten, che instancabile sfornava un articolo fondamentale dietro l'altro riversando le proprie idee direttamente nel computer.

Circa una settimana dopo il mio arrivo, chiacchierando con me nel giardino dell'Institute, Witten mi domandò quali fossero i miei progetti di ricerca. Gli raccontai delle mie idee sui flop e della strategia che intendevo adottare. Alle mie parole si illuminò, ma subito mi avvertì che i calcoli sarebbero stati terribilmente difficili. Evidenziò anche un possibile punto debole della mia strategia, che aveva a che vedere con un lavoro che avevo fatto alcuni anni prima in collaborazione con Vafa e Warner. La questione interessava soltanto marginalmente l'impostazione che noi avevamo scelto di seguire per capire i flop, ma fu da questa osservazione che Witten iniziò a riflettere su problemi che alla fine si rivelarono strettamente connessi e complementari ai nostri.

Aspinwall, Morrison e io decidemmo di frazionare il nostro calcolo in due parti. Si sarebbe potuto credere che una divisione naturale fosse quella che richiedeva in primo luogo la determinazione della fisica associata allo spazio di

Calabi-Yau finale della prima riga della figura 11.5 e in secondo luogo la determinazione della fisica associata al Calabi-Yau finale della seconda riga della figura. Se la relazione di simmetria speculare non è infranta dallo «strappo » che si verifica nei Calabi-Yau della prima riga, allora questi due spazi di Calabi-Yau finali dovrebbero dar luogo alla stessa fisica, non diversamente dai due Calabi-Yau iniziali dai quali derivano. (Questa formulazione del problema permette di evitare tutti i difficilissimi calcoli che concernono lo spazio di Calabi-Yau della prima riga nel momento in cui «si strappa »). Tuttavia, calcolare la fisica associata allo spazio di Calabi-Yau finale della prima riga risulta abbastanza semplice. La vera difficoltà sta tutta nel ricavare la forma precisa del Calabi-Yau finale della seconda riga della figura 11.5 - lo spazio candidato a essere il partner speculare del Calabi-Yau della prima riga - e nel determinare poi la fisica ad esso associata.

Una tecnica per realizzare questo secondo obiettivo - determinare le caratteristiche fisiche dello spazio di Calabi-Yau finale della seconda riga, una volta note le sue caratteristiche geometriche - era stata elaborata alcuni anni prima da Candelas. Il procedimento di Candelas però richiedeva una gran mole di calcoli e ci rendemmo conto che avremmo avuto bisogno di un efficiente programma informatico per applicarlo al nostro esempio esplicito. Aspinwall, che non è soltanto un fisico valente ma anche un abilissimo programmatore, si assunse questo compito. Morrison ed io ci accollammo invece il primo compito, vale a dire, quello di individuare la precisa forma geometrica dello spazio di Calabi-Yau candidato a essere il partner speculare.

Era questo il problema in cui ritenevamo che i risultati di Batyrev avrebbero potuto fornirci indicazioni preziose. Ancora una volta, lo iato culturale tra matematici e fisici - nel caso specifico, tra Morrison e me - si fece avvertire, ostacolando i nostri progressi. Avevamo bisogno di unire la forza delle due discipline per determinare la forma matematica degli spazi di Calabi-Yau della seconda riga della figura 11.5 che corrispondessero allo stesso universo fisico dei Calabi-Yau della prima riga, sempre ammesso che i flop rientrassero tra i fenomeni della natura. Ma nessuno di noi due aveva sufficiente dimestichezza con il linguaggio dell'altro per capire con chiarezza come raggiungere l'obiettivo. A entrambi divenne ovvio che dovevamo deciderci a saltare il fosso: ciascuno aveva bisogno di un corso intensivo nel campo di competenza dell'altro. E cosí, di giorno facevamo del nostro meglio per avanzare nei calcoli, mentre di sera diventavamo entrambi professore e allievo di una classe composta da un solo studente: io facevo una o due ore di lezione di fisica a Morrison, che a sua volta faceva una o due ore di lezione di matematica a me. In genere, la scuola finiva verso le 11 di sera.

Giorno dopo giorno ci attenevamo strettamente a questo programma di lavoro. I progressi erano lenti, ma avevamo la sensazione che le cose cominciassero ad andare a posto. Nel frattempo, Witten stava portando avanti la sua idea di riformulare il punto debole che aveva individuato nella nostra strategia, cercando di trovare un metodo nuovo e piú potente per tradurre la fisica della teoria delle stringhe nella matematica degli spazi di Calabi-Yau. Aspinwall, Morrison e io ci incontravamo quasi ogni giorno, in modo estemporaneo, con Witten, che non mancava di mostrarci nuove prospettive derivanti dalla sua impostazione. Con il trascorrere delle settimane divenne a poco a poco chiaro che il suo lavoro, muovendo da premesse generali del tutto diverse dalle nostre, stava convergendo verso la questione dei flop. Ci rendemmo conto che se non avessimo completato rapidamente il nostro calcolo, Witten ci avrebbe bruciato sul traguardo.

6. Sei bottiglie di birra.

Niente aguzza di piú l'ingegno di un fisico che una buona dose di competizione. Aspinwall, Morrison e io ci mettemmo a lavorare a pieno ritmo. C'è da notare che questa espressione ha un significato piuttosto differente per Aspinwall e per Morrison e me. Aspinwall costituisce uno strano connubio di raffinata sensibilità britannica - conseguenza dei dieci anni trascorsi a Oxford come studente, fino al dottorato - e un pizzico di scanzonata birbanteria. Le sue abitudini lavorative sono le piú civili che io abbia mai avuto modo di osservare in un fisico. Molti di noi lavorano fino a tarda sera: lui non lavora mai dopo le cinque. Molti di noi lavorano durante i weekend: Aspinwall mai. E riesce a fare cosí perché ha un'intelligenza pronta ed efficiente. Per lui lavorare a pieno ritmo non significa altro che aumentare ancora di piú il suo livello di efficienza.

Verso l'inizio di dicembre, tutte le lezioni che Morrison e io continuavamo da mesi a impartirci a vicenda cominciarono a dare i loro frutti. Sentivamo che ci mancava veramente poco per riuscire a determinare la forma precisa dello spazio di Calabi-Yau. che stavamo cercando. D'altra parte, Aspinwall aveva appena terminato di scrivere le istruzioni del suo programma e ora aspettava il nostro risultato, che doveva essere l'input richiesto. Un giovedì notte, finalmente, Morrison

e io fummo certi di sapere come fare per individuare il tanto agognato spazio di Calabi-Yau. Il problema si riduceva a un procedimento di calcolo che doveva essere implementato mediante un programma piuttosto semplice. Per venerdì pomeriggio avevamo già scritto il programma e fatto il *debug;* venerdì sera il risultato era nelle nostre mani.

Ma erano ormai passate le cinque di venerdì pomeriggio: Aspinwall se n'era andato a casa e non sarebbe tornato prima di lunedì. Senza il suo programma non potevamo fare niente. A nessuno di noi due andava giú l'idea di aspettare tutto il weekend. Eravamo sul punto di risolvere la difficile questione della possibilità di «strappi» nella trama spaziale dell'universo, su cui avevamo riflettuto cosí a lungo, e la tensione era davvero forte. Telefonammo ad Aspinwall chiedendogli di venire a lavorare con noi il mattino dopo. Dapprima non ne volle sapere, ma alla fine, dopo aver molto brontolato, acconsentì a ritornare all'Institute, a patto che gli compassimo una confezione di sei bottiglie di birra. Non trovammo nulla da obiettare.

7. Il momento della verità.

Come d'accordo, il sabato mattina ci incontrammo all'Institute. Era una splendida giornata di sole e l'atmosfera era allegra e rilassata. Personalmente, avevo un certo timore che Aspinwall non si sarebbe fatto vivo; quando arrivò, mi dilungai per un quarto d'ora a magnificare l'importanza dell'avvenimento: il primo weekend che trascorreva al lavoro. Mi giurò che non sarebbe mai piú successo.

Nello studio che Morrison ed io condividevamo, ci raccogliemmo tutti e tre attorno al computer. Aspinwall disse a Morrison come richiamare il suo programma sullo schermo e gli spiegò quale formato dare all'input. Morrison modificò nel modo opportuno i risultati che avevamo ottenuto la sera prima; eravamo pronti a partire.

Il calcolo che stavamo per fare si riduceva, piú o meno, a determinare la massa di certi tipi di particelle - specifici modi di vibrazione di una stringa - che si muovono in un universo la cui componente di Calabi-Yau è proprio quello spazio che eravamo riusciti a individuare lavorando tutto l'autunno. In accordo con la strategia che ho delineato nei paragrafi precedenti, speravamo che il valore di questa massa sarebbe risultato identico al valore determinato usando lo spazio di Calabi-Yau generato dal flop. Quest'ultimo era abbastanza facile da calcolare: già alcune settimane prima avevamo ottenuto un valore uguale a 3, nelle particolari unità di misura che stavamo adottando. Dato che il calcolo sul candidato partner speculare sarebbe stato eseguito numericamente, ci aspettavamo un risultato non esattamente uguale a 3, ma prossimo a questo valore (qualcosa come 3,000001 oppure *2,999999,* con un piccolo scarto in eccesso o in difetto dovuto agli errori di arrotondamento).

Morrison sedeva davanti al computer, esitando a premere il tasto « invio ». La tensione cresceva. Finalmente si decise: « Si parte », e avviò il programma. In un paio di secondi il computer ci restituì la sua risposta: *8,999999.* Mi sentii mancare. Era mai possibile che i flop infrangessero la simmetria speculare, mostrando cosí, molto probabilmente, di non poter esistere in natura? Quasi subito, però, ci rendemmo conto tutti quanti che doveva essere successo qualcosa di strano. Se ci fosse stata una reale discrepanza fisica derivante dalle differenze geometriche tra i due spazi di Calabi-Yau, sarebbe stato estremamente improbabile ottenere dal computer un valore cosí vicino a un numero intero. Se le nostre idee fossero state errate, allora l'unico risultato che avremmo dovuto ragionevolmente aspettarci era un insieme di cifre del tutto casuali. Il valore indicato dal computer era sbagliato, sí, ma sembrava suggerire, forse, che avevamo commesso qualche banale errore aritmetico. Aspinwall e io andammo alla lavagna e individuammo subito lo sbaglio: avevamo omesso un fattore 3 nel calcolo «piú semplice» fatto molte settimane prima. Il risultato giusto era 9. La risposta del computer era dunque proprio quello che volevamo.

Questa conferma a posteriori, tuttavia, non ci rendeva ancora pienamente convinti. Sapendo già quale risposta si vuole avere, è spesso fin troppo facile trovare il modo di ottenerla. Avevamo bisogno di provare con un altro esempio. Poiché il programma necessario era già pronto, questo compito non era difficile. Calcolammo la massa di un'altra particella sullo spazio di Calabi-Yau della prima riga, stando ben attenti questa volta a non fare errori. Il risultato che trovammo era 12. Di nuovo, tutti e tre intorno al computer, lanciammo il programma. Qualche secondo piú tardi arrivò la risposta: *11,999999.* Giusto. Avevamo cosí dimostrato che il candidato partner speculare è effettivamente tale e che, di conseguenza, la fisica della teoria delle stringhe contempla anche transizioni attraverso flop in cui si producono strappi nella trama dello spazio.

A questo punto balzai in piedi e mi misi a celebrare la vittoria percorrendo un giro d'onore all'interno dello studio. Morrison, dietro il suo computer, era raggiante. La reazione di Aspinwall. fu invece alquanto diversa. «Splendido, ma sapevo che avrebbe funzionato », disse con molta calma. «E dov'è la mia birra?»

8. L'idea di Witten.

Il lunedì successivo andammo trionfalmente da Witten ad annunciargli il nostro successo. Si congratulò vivamente con noi. Anche lui, ci disse, aveva appena scoperto un modo di dimostrare che le transizioni attraverso flop sono ammesse dalla teoria delle stringhe. La sua argomentazione era alquanto diversa dalla nostra e dava una spiegazione a livello microscopico del perché gli «strappi» dello spazio non hanno conseguenze catastrofiche.

Il ragionamento di Witten evidenzia la differenza essenziale tra una teoria basata su particelle puntiformi e una teoria basata su stringhe nel caso si verifichino «strappi» spaziali. Il fatto è che una stringa può effettuare due diversi tipi di moto in prossimità di uno strappo, mentre una particella può muoversi in una sola maniera. Precisamente, una stringa può passare accanto allo strappo, proprio come una particella, oppure può spostarsi formando una circonferenza attorno ad esso, come mostrato nella figura 11.6. L'analisi di Witten, in buona sostanza, rivela che le stringhe che circondano lo strappo (un fenomeno, questo, che non può verificarsi in una teoria particellare) formano una specie di scudo che protegge l'universo circostante dagli effetti catastrofici, che in caso contrario non mancherebbero di prodursi. E' come se il foglio di universo della stringa - cioè, come abbiamo spiegato nel capitolo *VI,* la superficie bidimensionale generata dalla stringa durante il moto - costituisse una barriera protettiva in grado di neutralizzare esattamente le conseguenze perniciose della degenerazione geometrica dello spazio.

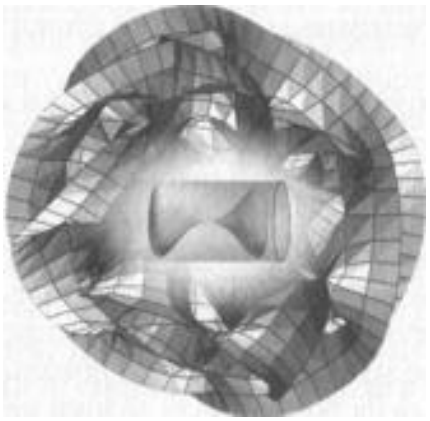

Figura 11.6.
Il foglio di universo descritto da una stringa fornisce uno scudo che cancella gli effetti potenzialmente catastrofici associati a uno strappo della trama dello spazio.

Ci si potrebbe però domandare: che cosa succede se lo strappo si produce quando non ci sono stringhe nelle vicinanze a fornire adeguata protezione ? E ancora: com'è mai possibile che nell'istante stesso in cui avviene lo strappo, una stringa - che è un oggetto circolare infinitamente sottile -riesca a costituire una barriera davvero efficace? Non sarebbe come cercare di proteggersi dall'esplosione di una bomba nascondendosi dietro a un hula-hoop? La risposta a questi interrogativi si basa su una delle proprietà fondamentali della meccanica quantistica. Come abbiamo visto nel capitolo IV, nella formulazione di Feynman della meccanica quantistica, un oggetto - sia esso una particella o una stringa - si muove da un posto all'altro «fiutando » tutte le traiettorie possibili. Il moto osservato risulta dalla combinazione di *tutti i possibili* cammini e la matematica della meccanica quantistica prescrive con esattezza quale sia il contributo relativo di ciascun cammino. Se si produce uno strappo nella trama dello spazio, allora tra tutte le possibili traiettorie di una stringa bisogna considerare anche quelle che si avvolgono attorno allo strappo, traiettorie come quella nella figura 11.6. Anche se nessuna stringa sembra essere presente in prossimità dello strappo quando questo si determina, la meccanica quantistica tiene conto degli effetti fisici derivanti da tutte le possibili traiettorie della stringa, e tra queste ci sono moltissimi - addirittura infiniti - cammini «protettivi» che circondano lo strappo. Questi cammini danno contributi - come Witten riuscì a dimostrare - che neutralizzano la catastrofe cosmica che lo strappo altrimenti scatenerebbe.

Nel gennaio del 1993, sia Witten sia Aspinwall, Morrison e io spedimmo contemporaneamente i nostri lavori all'archivio elettronico di Internet, grazie al quale gli articoli di fisica divengono immediatamente disponibili agli studiosi del mondo intero. I due articoli descrivevano, da prospettive profondamente diverse, i primi esempi di «transizioni con cambiamento di topologia» *(topology changing transitions) il* termine tecnico che designa le trasformazioni che producono «strappi» da noi descritte. La teoria delle stringhe aveva reso possibile risolvere quantitativamente il problema della possibilità di strappi nella trama dello spazio.

9. Conseguenze.

Abbiamo molto insistito sul fatto che la trama dello spazio può strapparsi senza che ciò inneschi nessuna catastrofe cosmica. Ma che cosa succede quando la trama dello spazio si lacera? Quali sono gli effetti fisici osservabili? Abbiamo visto che molte proprietà del mondo che ci circonda dipendono specificamente dalla struttura delle dimensioni compattificate. Potremmo aspettarci, perciò, che la trasformazione piuttosto energica dello spazio di Calabi-Yau rappresentato nella figura 11.5 abbia conseguenze fisiche significative. A dire il vero, i disegni in dimensione piú bassa che usiamo per visualizzare gli spazi di Calabi-Yau fanno sí che la trasformazione appaia un po' piú complicata di quanto in realtà non sia. Se riuscissimo a visualizzare la geometria a sei dimensioni, ci accorgeremmo che, sí, la trama dello spazio si strappa, ma in una maniera molto delicata. E' qualcosa di piú simile al lavorio di una tarma sulla lana che al progressivo sformarsi e lacerarsi nel ginocchio di un paio di pantaloni che si sono ristretti.

Sia il nostro lavoro, sia quello di Witten dimostrano che molte caratteristiche fisiche, quali il numero di famiglie di vibrazioni di stringa e i tipi di particella all'interno di ciascuna famiglia, rimangono inalterate durante trasformazioni di questo genere. Durante la transizione attraverso flop di uno spazio di Calabi-Yau, si modificano invece i valori delle masse delle singole particelle, cioè le energie dei possibili modi di vibrazione delle stringhe. I nostri articoli mostravano che queste masse variano in modo continuo, alcune aumentando, altre diminuendo, in risposta ai cambiamenti geometrici della porzione Calabi-Yau dello spazio. E' di estrema importanza, tuttavia, che le variazioni delle masse non presentino discontinuità catastrofiche o altre caratteristiche inusuali al momento in cui si verifica lo «strappo». Dal punto di vista fisico, questa degenerazione geometrica non produce alcun effetto particolare.

Questa constatazione solleva due problemi. In primo luogo, abbiamo concentrato la nostra attenzione sugli <<strappi>> nella trama spaziale della componente di Calabi-Yau del nostro universo, quella costituita dalle sei dimensioni extra. Ma è possibile che si producano strappi anche nelle usuali tre dimensioni estese dello spazio? Quasi certamente sí. In fin dei conti, lo spazio è lo spazio, a prescindere dal fatto che sia compresso e arrotolato in una varietà di Calabi-Yau oppure dispiegato nelle immense vastità del cosmo, che ammiriamo in una notte stellata. In effetti, abbiamo già osservato che anche le consuete tre dimensioni spaziali potrebbero essere curve e ritornare su se stesse dopo aver attraversato l'intero universo, cosicché la rigida distinzione tra dimensioni arrotolate e dimensioni estese è alquanto artificiosa. Seppure la nostra analisi e quella di Witten si fondino su particolari caratteristiche matematiche degli spazi di Calabi-Yau, il risultato che otteniamo - il fatto che la trama dello spazio si possa strappare - rimane certamente valido anche in un contesto piú generale.

In secondo luogo, un simile cambiamento di topologia, causato da uno «strappo » nella trama dello spazio, potrebbe verificarsi oggi o domani ? Potrebbe essersi verificato in passato ? Le misure sperimentali delle masse delle particelle elementari dimostrano che queste sono significativamente stabili nel tempo. Ma se consideriamo i primissimi istanti dopo il big bang, anche le teorie non di stringa devono assumere l'esistenza di periodi in cui le masse delle particelle elementari variano nel tempo. Nell'ottica della teoria delle stringhe, è molto probabile che durante questi periodi si siano verificati degli « strappi », con conseguente cambiamento di topologia, come quelli discussi nel presente capitolo. Per tornare al presente, la stabilità, sperimentalmente osservata, delle masse delle particelle elementari implica che, se la trama spaziale dell'universo sta attualmente subendo uno «strappo» che modifica la sua topologia, ciò deve avvenire in maniera estremamente lenta - cosí lenta che gli effetti sulle masse delle particelle elementari sono al di sotto del potere risolutivo dei nostri apparati sperimentali. Per quanto sorprendente sia, se tale condizione è soddisfatta, il nostro universo potrebbe attualmente trovarsi nel bel mezzo di un processo di degenerazione geometrica. Anzi, se questo fosse abbastanza lento, potremmo anche non accorgercene mai. E' questo uno di quei rari casi, in fisica, in cui ciò che suscita il nostro interesse è proprio la mancanza di fenomeni osservabili di una qualche entità. Il fatto che un'evoluzione geometrica cosí singolare

sia priva di qualsiasi conseguenza catastrofica testimonia quanto oltre le previsioni di Einstein si sia spinta la teoria delle stringhe.

Capitolo dodicesimo

Oltre le stringhe: alla ricerca della M-teoria

Durante la sua inesausta ricerca di una teoria di campo unificato, ad Einstein capitò di domandarsi se «Dio non avrebbe potuto fare l'universo in un modo diverso, cioè se la necessità di semplicità logica lascia una qualche libertà oppure no».[1] Albert Einstein, citato in John D. Barrow, *Theories of Everything,* Oxford University Press, Oxford iggi [trad. it. *Teorie del tutto,* Adelphi, Milano 19921.

Con questa osservazione Einstein inaugurò un punto di vista che è ancora oggi condiviso da molti fisici: se esiste una teoria ultima della natura, il fatto che essa non possa essere formulata in modo diverso rappresenterebbe una delle argomentazioni piú convincenti in favore della sua forma specifica. Questa teoria deve assumere la forma che effettivamente assume poiché rappresenta l'unico quadro concettuale capace di descrivere l'universo senza incappare in contraddizioni interne o in assurdità logiche. Una teoria di questo tipo affermerebbe che le cose sono come sono perché *devono* essere cosí. Qualsiasi cambiamento, per quanto insignificante, produrrebbe una teoria che - proprio come l'enunciato «questa frase è falsa» - conterrebbe in sé i germi del suo proprio annientamento.

Stabilire che la struttura dell'universo ha veramente un tale carattere di inevitabilità avrebbe implicazioni di vasta portata: si darebbe una risposta definitiva a quegli antichissimi interrogativi incentrati sul mistero che circonda chi o ciò che ha fatto le scelte - apparentemente innumerevoli -necessarie per progettare l'universo cosí com'è. L'inevitabilità risolve tali questioni alla radice eliminando la possibilità di scelta: l'universo non sarebbe potuto essere diverso, non esistono alternative. Come vedremo nel capitolo XIV, niente sembra garantirci che l'universo sia costruito in modo cosí ineluttabile. Ciò nonostante, la ricerca di strutture rigide nelle leggi di natura rimane l'obiettivo centrale del programma di unificazione della fisica contemporanea.

Verso la fine degli anni ottanta ai fisici divenne chiaro che la teoria delle stringhe, per quanto arrivi molto vicino a fornire una descrizione unificante dell'universo, non riesce però a raggiungere questo obiettivo. Due ragioni erano alla base di questa consapevolezza. In primo luogo, come abbiamo brevemente ricordato nel capitolo VII, i fisici avevano scoperto che esistevano *cinque* differenti varianti della teoria delle stringhe. Ricorderete forse i nomi di queste teorie: tipo I, tipo IIA, tipo IIB, eterotica O(32) (in breve, eterotica-O) ed eterotica E8 x E8 (in breve, eterotica-E). Tutte hanno in comune numerose caratteristiche di base -necessitano di dieci dimensioni spaziali, di cui sei compattificate in uno spazio di Calabi-Yau, i modi di vibrazione determinano le masse e le cariche di gauge, ecc. - e per questo motivo nei capitoli precedenti non abbiamo ritenuto opportuno insistere sulle loro differenze. Ma queste differenze esistono, come hanno messo in luce varie ricerche risalenti agli anni ottanta. Il lettore interessato potrà trovare maggiori dettagli nelle note alla fine di questo capitolo, ma è sufficiente sapere che queste teorie di stringa differiscono per il modo in cui incorporano la supersimmetria e per significative caratteristiche dei modi di vibrazione ammissibili.[2] Illustriamo brevemente quali sono le differenze tra le cinque teorie di stringa. A questo scopo, osserviamo innanzitutto che le vibrazioni possono viaggiare lungo la circonferenza di una stringa sia in senso orario sia in senso antiorario. Le teorie di stringa di tipo IIA e di tipo IIB si differenziano per il fatto che, nella seconda, queste vibrazioni orarie e antiorarie sono identiche, mentre, nella prima, esse hanno forma esattamente opposta. Il termine «opposto» ha in questo contesto un ben preciso significato matematico, ma può essere piú facile pensare agli spin dei corrispondenti modi di vibrazioni in ciascuna teoria. Nella teoria di tipo IIB tutte le particelle hanno spin nella stessa direzione (hanno tutte la stessa chiralità), mentre nella teoria di tipo IIA le particelle

possono avere spin in entrambe le direzioni (hanno entrambe le chiralità). Entrambe le teorie, comunque, sono supersimmetriche. Le due teorie eterotiche hanno differenze analoghe, ma molto piú profonde. Le loro vibrazioni orarie sono simili a quelle delle stringhe di tipo II (se si considerano soltanto queste vibrazioni le teorie di tipo IIA e di tipo IIB sono identiche), ma le loro vibrazioni antiorarie sono uguali a quelle delle stringhe bosoniche. Sebbene la teoria di stringa bosonica generi contraddizioni insormontabili nel caso in cui incorpori sia vibrazioni orarie che antiorarie, nel 1985 David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec e Ryan Rohm (allora tutti della Princeton University e scherzosamente soprannominati il « Princeton String Quartet ») riuscirono a dimostrare che essa dà luogo a una teoria perfettamente sensata se viene «ibridata» con le teorie di tipo II. La caratteristica davvero bizzarra di questa unione sta nel fatto che la stringa bosonica (com'è noto dai risultati ottenuti nel 1971 da Claude Lovelace della Rutgers University e da quelli del 1972 di Richard Brower della Boston University, Peter Goddard della Cambridge University e Charles Thorn della University of Florida a Gainesville) richiede uno spaziotempo a 26 dimensioni, mentre le superstringhe, come abbiamo visto, vivono in uno spaziotempo che ha solo 10 dimensioni. Cosí, la stringa eterotica è il risultato di una strana ibridazione - eterosi *(heterosis)* - *che* prevede che i modi di vibrazione antiorari vivano in 26 dimensioni e quelli orari in 10 dimensioni! Prima che vi scervelliate per trovare un senso in questa stramba combinazione, diciamo subito che Gross e i suoi collaboratori hanno mostrato che le 16 dimensioni extra richieste dalla stringa bosonica devono essere compattificate in spazi molto particolari a forma di ciambella multidimensionale e che esistono esattamente due possibilità, che danno luogo alle teorie eterotica-E ed eterotica-O. Dato che queste 16 dimensioni bosoniche sono arrotolate in maniera cosí rigida, entrambe le teorie si comportano come se avessero in realtà soltanto 10 dimensioni, non diversamente dalle teorie di tipo II. Anche le due teorie di stringa eterotica sono supersimmetriche. La teoria di tipo I, infine, è una stretta parente.di quella di tipo IIB, con una differenza: oltre alle stringhe chiuse che abbiamo descritto nei capitoli precedenti, contiene anche *stringhe aperte, i cui* estremi, cioè, sono liberi.

(La teoria di stringa di tipo I, per esempio, ha anche stringhe aperte, con gli estremi liberi, oltre alle stringhe chiuse delle quali ci siamo occupati). Questa superabbondanza ha creato un certo imbarazzo tra i teorici delle stringhe, perché avere un'unica teoria candidata a essere la teoria unificata ultima è sensazionale, ma averne cinque è un eccesso che finisce per indebolirle tutte quante.

La seconda ragione che fa apparire la teoria delle stringhe non inevitabile è piú sottile. Per intendere appieno la questione, dovete concordare sul fatto che ogni teoria fisica consta di due parti. La prima è l'insieme delle idee fondamentali della teoria, che sono di solito espresse sotto forma di equazioni matematiche. La seconda parte è costituita dalle soluzioni di queste equazioni. Genericamente parlando, alcune equazioni hanno una e una sola soluzione, mentre altre ammettono piú di una soluzione. (Per fare un esempio elementare, l'equazione « 2 per un certo numero è uguale a 10 » ha un'unica soluzione: *5.* Al contrario, l'equazione «zero per un certo numero *è* uguale a zero» ammette infinite soluzioni, dato che zero moltiplicato per *qualsiasi* numero fa zero). E cosí, anche se la ricerca approda a un'unica teoria con un unico insieme di equazioni, l'inevitabilità della teoria potrebbe essere compromessa dal fatto che le equazioni ammettono molte soluzioni possibili. Verso la fine degli anni ottanta, ci si accorse che per la teoria delle stringhe le cose stavano proprio in questo modo. Studiando le equazioni di una qualunque delle cinque teorie di stringa, i fisici scoprirono infatti che esse ammettono molte soluzioni - ad esempio, molti possibili spazi su cui compattificare le dimensioni extra - e che ogni soluzione corrisponde a un universo con proprietà diverse. La maggior parte di questi universi, sebbene nascano tutti come soluzioni perfettamente valide delle equazioni di una teoria di stringa, non sembrano avere niente a che vedere con il mondo che conosciamo.

Queste violazioni del principio di inevitabilità potrebbero sembrare inconvenienti connaturati alle teorie di stringa. Tuttavia, nuove linee di ricerca che hanno preso l'avvio dalla metà degli anni novanta ci fanno sperare che i difetti finora riscontrati siano una diretta conseguenza del modo errato con cui i fisici hanno analizzato la teoria. In poche parole, le equazioni delle teorie di stringa sono talmente complicate che nessuno sa la loro espressione precisa: i fisici sono riusciti a scriverle soltanto in forma approssimata. Sono queste equazioni approssimate che risultano significativamente diverse da una teoria di stringa all'altra. E sono queste equazioni approssimate, nell'ambito di ciascuna delle cinque teorie di stringa, che generano una moltitudine di soluzioni, un profluvio di universi indesiderati.

Dal *1995* (l'anno di inizio della seconda rivoluzione delle superstringhe) si sono accumulati molti indizi dai quali sembra emergere che le equazioni esatte - la cui espressione precisa non è ancora alla nostra portata -potrebbero risolvere questi problemi e contribuire cosí a imprimere sulla teoria delle stringhe il sigillo della inevitabilità. I teorici delle stringhe, infatti, sono già riusciti a stabilire, con loro grande soddisfazione, che le equazioni esatte, una volta che saranno state comprese, mostreranno che tutte le cinque teorie di stringa sono intimamente connesse l'una all'altra. Simili alle

punte di una stella di mare, queste cinque teorie fanno parte di una singola entità, le cui specifiche proprietà sono attualmente oggetto di un'intensa attività di ricerca. Invece di cinque teorie distinte, i fisici sono ora convinti che esista un'u*nica* teoria, in grado di armonizzarle tutte quante in un quadro teorico coerente. E come accade quando relazioni rimaste nascoste vengono d'un tratto messe in luce, questa sintesi apre nuove prospettive per comprendere l'universo in base ai principi della teoria delle stringhe.

Per spiegare questi sviluppi dobbiamo misurarci con alcune delle idee piú avanzate e piú difficili della teoria delle stringhe. Dobbiamo capire quale sia il carattere delle approssimazioni usate nella teoria delle stringhe e quali siano le loro limitazioni intrinseche. Dobbiamo acquisire una certa dimestichezza con quelle tecniche - denominate genericamente *dualità* -delle quali i fisici si servono come astute scappatoie per evitare di ricorrere a tali approssimazioni. Infine, dobbiamo ricostruire il sottile ragionamento che fa uso di queste tecniche di dualità per giungere ai nuovi sviluppi cui si accennava poco sopra. Ma non preoccupatevi troppo. Il lavoro veramente duro è già stato fatto dai teorici delle stringhe e noi ci limiteremo a spiegare i risultati da loro ottenuti.

Ciò nonostante, dato che sono molti gli argomenti, apparentemente scollegati, che dovremo illustrare e mettere insieme, potrebbe risultare particolarmente difficile in questo capitolo seguire il filo del discorso, guardando gli alberi senza perdere di vista la foresta. Se per caso l'esposizione dovesse diventare troppo complicata, invogliandovi cosí a saltare direttamente al capitolo sui buchi neri (cap. XIII) e a quello sulla cosmologia (cap. XIV), vi consiglierei di dare comunque una scorsa al paragrafo seguente, in cui sono riassunte le idee chiave della seconda rivoluzione delle superstringhe.

1. Un breve riassunto della seconda rivoluzione delle superstringhe.

L'idea di fondo della seconda rivoluzione delle superstringhe è sintetizzata dalle figure 12.1 e 12.2. La figura 12.1 mostra come si presentava la situazione prima che si acquisisse la capacità di superare (almeno parzialmente) i metodi di approssimazione tradizionalmente usati dai fisici per analizzare la teoria delle stringhe. Come si vede, le cinque teorie di stringa erano considerate del tutto scollegate l'una dall'altra. Ma i recenti progressi della ricerca indicano che tutte queste teorie - simili alle cinque punte di una stella di mare - si fondono in unico schema concettuale onnicomprensivo, rappresentato nella figura 12.2. (In realtà, come vedremo alla fine del capitolo, nello schema dovremo incorporare anche una sesta teoria). Questo schema unificante è stato provvisoriamente denominato *M-teoria.* La figura 12.2 rappresenta una situazione che costituisce un avanzamento di capitale importanza nella ricerca della teoria ultima. I vari tasselli della ricerca sulle teorie di stringa, che apparivano del tutto privi di qualsiasi relazione reciproca, sono ora riuniti in un mosaico coerente - un'unica teoria onnicomprensiva, che potrebbe essere la tanto cercata Teoria del Tutto.

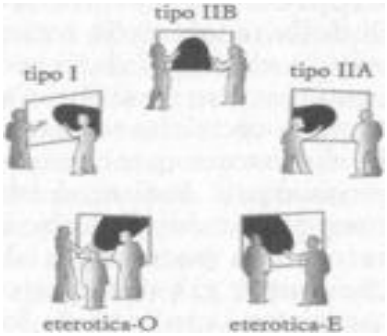

Figura 12.1.

Per molti anni i fisici che studiavano le cinque teorie di stringa erano convinti di lavorare su teorie completamente distinte.

Sebbene rimanga da fare ancora molto lavoro, i fisici hanno già individuato due caratteristiche essenziali della M-teoria. Innanzi tutto, la M-teoria ha *undici* dimensioni (dieci spaziali e una temporale). All'incirca nello stesso modo in cui Kaluza aveva scoperto che l'aggiunta di una dimensione spaziale permetteva un'insperata fusione di relatività generale ed elettromagnetismo, i teorici delle stringhe si sono accorti che l'aggiunta di una dimensione spaziale - oltre alle nove

dimensioni spaziali e una temporale che abbiamo descritto nei capitoli precedenti - rende possibile unificare, in un unico quadro significativo e soddisfacente, le cinque preesistenti versioni della teoria. Per di piú, questa undicesima dimensione non salta fuori dal nulla, al contrario: i fisici si sono resi conto che i ragionamenti degli anni settanta e ottanta, che suggerivano l'esistenza di nove dimensioni spaziali e una temporale, erano soltanto *approssimati,* mentre i calcoli esatti, che ora si riescono a portare a termine, mostrano che è necessario considerare un'ulteriore dimensione spaziale.

La seconda caratteristica ormai -assodata della M-teoria è che contiene, oltre a stringhe vibranti, anche altri elementi: membrane bidimensionali vibranti, masserelle tridimensionali oscillanti (chiamate tribrane) e una miriade di altri oggetti. Come per l'undicesima dimensione, anche queste proprietà della M-teoria emergono una volta che i calcoli non si riducono piú a quelle tecniche di approssimazione che si usavano prima della metà degli anni novanta.

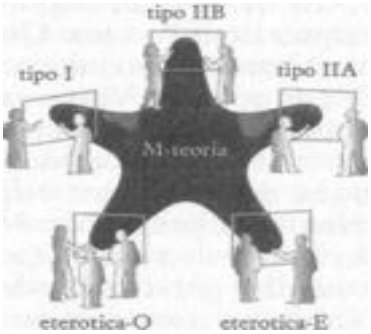

Figura 12.2.

La seconda rivoluzione delle superstringhe ha mostrato che tutte e cinque le teorie di stringa fanno parte di un unico schema onnicomprensivo, il cui nome provvisorio è M-teoria.

A parte questi aspetti, e vari altri scoperti negli ultimi anni, la vera natura della M-teoria rimane in gran parte misteriosa, tanto che qualcuno ha suggerito che proprio questo sia il significato della « M ». I fisici di tutto il mondo lavorano con strenuo impegno per comprendere a fondo la M-teoria, e questo sarà probabilmente il problema cruciale della fisica del ventunesimo secolo.

2. Un metodo di approssimazione.

Le limitazioni dei metodi che i fisici hanno usato per studiare la teoria delle stringhe derivano da una cosa denominata *teoria perturbativa.* Con questa espressione astrusa si indica una tecnica per affrontare problemi di calcolo, che consiste nel fare una prima approssimazione grossolana e cercare quindi di renderla sempre piú accurata tenendo conto di dettagli via via piú minuti, inizialmente trascurati. I metodi perturbativi hanno un ruolo importante in molti settori della ricerca scientifica, sono stati uno strumento essenziale per analizzare la teoria delle stringhe, e - come vedremo nell'esempio seguente - si applicano abbastanza spesso anche nella vita di ogni giorno.

Immaginiamo che voi siate costretti a portare la vostra automobile dal meccanico per farla revisionare. Dopo una rapida occhiata, il meccanico vi dà una brutta notizia: c'è da sostituire il blocco motore, per una spesa complessiva - tra pezzi di ricambio e manodopera - che si aggira sul 1.800.000 lire. Naturalmente, sapete bene che questo è soltanto un preventivo iniziale, che diventerà sempre piú preciso via via che salteranno fuori le varie riparazioni da fare. Qualche giorno piú tardi, il meccanico, che ha avuto tempo di fare altri controlli, vi fornisce un preventivo piú accurato: 1.900.000 lire. Vi spiega infatti che c'è bisogno di cambiare anche la valvola a farfalla, il cui costo totale - manodopera inclusa - è intorno alle 100.000 lire. Quando finalmente andate a ritirare la macchina, il conto che dovete pagare è di *1.975.*800 lire. Questa cifra - specifica il meccanico -comprende il 1.800.000 lire per il blocco motore, le 100.000 lire per la valvola a farfalla, oltre a *54.*000 lire per la cinghia della ventola, 20.000 lire per un cavo della batteria e 1.800 lire per un fusibile. La stima iniziale è stata precisata tenendo conto di dettagli sempre piú minuti. Nel linguaggio della fisica, si direbbe che questi dettagli sono *perturbazioni* del preventivo iniziale.

Se i metodi perturbativi si applicano in maniera corretta ed efficace, la stima iniziale sarà ragionevolmente vicina al risultato finale; includere nel calcolo i dettagli tralasciati nell'approssimazione iniziale deve avere un effetto marginale. A

volte capita però che il conto da pagare sia molto piú salato del preventivo iniziale. In casi simili - anche se a volte sareste magari tentati di ricorrere a espressioni piú colorite - si parla tecnicamente di inadeguatezza dei metodi perturbativi. Ciò significa che l'approssimazione iniziale non costituiva una buona indicazione di partenza per giungere al risultato finale, perché i «raffinamenti» successivi, invece di provocare correzioni relativamente piccole, hanno l'effetto di alterare in modo considerevole la stima preventiva.

Come abbiamo già osservato piú volte nei capitoli precedenti, l'approccio alla teoria delle stringhe seguito fino a questo punto si è basato su metodi perturbativi, analoghi a quelli usati dal meccanico. Se la nostra comprensione della teoria delle stringhe è «incompleta» - e lo abbiamo ripetuto spesso - si deve, in ultima analisi, all'inadeguatezza dei metodi di approssimazione. Cerchiamo di farci un'idea piú precisa della portata di questa importante osservazione esaminando i metodi perturbativi in un caso meno astratto della teoria delle stringhe, ma senz'altro piú pertinente dell'esempio del meccanico.

3. Metodi perturbativi nella fisica classica.

Lo studio del moto della Terra nel sistema solare fornisce un esempio classico di applicazione dei metodi perturbativi. Dato che le distanze considerate sono molto grandi, possiamo tenere conto solo della forza gravitazionale; nonostante questa semplificazione, si ottengono equazioni estremamente complicate, che non si riescono a risolvere se non si fanno ulteriori approssimazioni. Sia la teoria di Newton sia quella di Einstein prevedono che ogni corpo eserciti un'attrazione gravitazionale su tutti gli altri corpi, e cosí tra la Terra, il Sole, la Luna, gli altri pianeti e, in linea di principio, tutti gli altri corpi celesti, si innesca una sorta di intricatissimo tiro alla fune gravitazionale, che è matematicamente intrattabile. Come potete facilmente immaginare è infatti impossibile determinare il moto « esatto» della Terra tenendo conto di tutte le attrazioni gravitazionali che entrano in gioco. In verità, sarebbero sufficienti anche solo tre corpi celesti per rendere le equazioni talmente complicate che nessuno è mai riuscito a risolverle in modo completo.[3] Quando usiamo il termine «esatto» - come nell'espressione «moto esatto della Terra» -intendiamo riferirci alla determinazione esatta di una quantità fisica *nell'ambito di un dato sistema teorico.* Finché non avremo la teoria ultima - forse già l'abbiamo, forse non l'avremo mai - tutte le nostre teorie saranno soltanto approssimazioni della realtà. Tale concetto di « approssimazione», tuttavia, non ha niente a che vedere con le idee che stiamo cercando di spiegare in questo capitolo. Ciò che vogliamo sottolineare è il fatto che, per quanto le previsioni di una data teoria siano in sé esatte, risulta spesso difficile, se non impossibile, calcolarle. Dobbiamo dunque accontentarci di ottenerle in maniera approssimata usando un approccio perturbativo.

Nonostante queste difficoltà è possibile prevedere il moto della Terra nel sistema solare con grande precisione facendo uso di metodi perturbativi. Poiché il Sole ha una massa enorme in confronto a quella degli altri componenti del sistema solare ed è tanto vicino alla Terra in confronto a tutte le altre stelle, il suo influsso sul moto del nostro pianeta è di gran lunga quello predominante. Possiamo cosí ottenere una prima stima approssimata - del tutto soddisfacente per molti scopi considerando solo l'attrazione gravitazionale del Sole. Se necessario, possiamo rendere piú precisa questa approssimazione includendo a mano a mano gli altri corpi celesti, a cominciare da quelli che esercitano effetti gravitazionali piú cospicui, come la Luna e i pianeti che in quel dato momento sono piú vicini all'orbita terrestre. Quanto piú complicato si farà l'intreccio delle attrazioni gravitazionali, tanto piú difficili diventeranno i calcoli da eseguire, ma ciò non intacca la filosofia perturbativa: l'interazione gravitazionale Terra-Sole ci dà una soluzione approssimata del moto della Terra, mentre gli altri influssi gravitazionali forniscono una serie di successivi raffinamenti, via via sempre meno importanti.

In questo caso l'approccio perturbativo funziona perché c'è un effetto fisico predominante, che ammette una descrizione teorica relativamente semplice. Ma le cose non stanno sempre cosí. Studiando il moto di tre stelle di massa piú o meno uguale che si attraggono vicendevolmente, non si osserva, ad esempio, nessun influsso gravitazionale rispetto al quale tutti gli altri risultino trascurabili. Di conseguenza, non è possibile ottenere una buona approssimazione del moto del sistema considerando una qualche interazione come predominante e includendo gli altri effetti come «raffinamenti» successivi. Se cercassimo di usare un metodo perturbativo - scegliendo, poniamo, l'attrazione gravitazionale tra due delle tre stelle per ricavare una descrizione approssimata del fenomeno - scopriremmo ben presto che il procedimento non funziona. I calcoli mostrerebbero infatti che la «correzione» al moto del sistema derivante dagli effetti gravitazionali della terza stella non è affatto piccola, ma dello stesso ordine di grandezza della presunta approssimazione iniziale. In fondo, questo non è strano: i movimenti di tre persone che ballano la hora sono ben diversi da quelli di due persone che ballano il

tango. Una correzione troppo grande significa che l'approssimazione era completamente sballata e che tutto lo schema era soltanto un castello di carte. E' importante rendersi conto che questo non è dovuto unicamente al fatto che l'attrazione gravitazionale della terza stella non è trascurabile in sé e per sé. Si verifica invece una specie di reazione a catena: la correzione ha un influsso significativo sul moto delle altre due stelle, che a sua volta ha un influsso non trascurabile sul moto della terza stella, che a sua volta ha un influsso considerevole sul moto delle altre due e cosí via. In simili casi, spesso e volentieri, l'unica risorsa che rimane per risolvere il problema consiste nell'usare la forza bruta dei computer per simulare il moto complessivo del sistema.

L'esempio che abbiamo discusso mette in evidenza quanto sia importante, quando si ricorre a metodi perturbativi, stabilire se l'approssimazione iniziale è azzeccata o meno e, ammesso che lo sia, quali e quanti «raffinamenti» successivi dobbiamo includere nel calcolo per raggiungere il livello di accuratezza voluto. Come ora vedremo, questi sono aspetti cruciali nell'applicazione dei metodi perturbativi alla teoria delle stringhe.

4. L'approccio perturbativo alla teoria delle stringhe.

Nella teoria delle stringhe tutti i processi fisici sono ricostruiti a partire dalle interazioni tra stringhe in vibrazione. Come abbiamo spiegato nella parte finale del capitolo VI,* I lettori che l'avessero omessa in prima lettura, potrebbero forse trovare utile dare un'occhiata alla prima parte del paragrafo «Una spiegazione piú precisa» del capitolo VI. le stringhe interagiscono tra loro dividendosi e unendosi, come mostra la figura 6.7, che per comodità abbiamo riprodotto nella figura 12.3. 1 fisici teorici sono riusciti ad associare al diagramma della figura 12.3 una formula matematica che esprime l'influsso che ogni stringa esercita sul moto dell'altra. (Questa formula è in realtà leggermente differente in ciascuna delle cinque teorie di stringa, ma per il momento trascureremo questi dettagli). Se non fosse per gli effetti quantistici, questa formula ci direbbe tutto quello che c'è da sapere sulle interazioni delle stringhe. Ma il principio di indeterminazione implica che coppie stringa/antistringa - cioè coppie costituite da due stringhe che hanno modi di vibrazione opposti - possono irrompere sulla scena, prendendo in prestito energia dall'universo, a condizione che si annichilino abbastanza in fretta per reintegrare questo debito di energia. Queste coppie di stringhe - che sono frutto di quella «frenesia » microscopica imposta dal principio di indeterminazione e devono rapidamente ricombinarsi in un unico laccio, dato che vivono di energia presa in prestito - sono dette *coppie di stringhe virtuali.* La presenza di queste coppie virtuali, per quanto di brevissima durata, modifica in modo sostanziale le proprietà dell'interazione.

La figura 12.4 illustra questo fenomeno. Le due stringhe iniziali collidono nel punto a, unendosi a formare un laccio unico. Questo laccio continua ad avanzare, ma nel punto b le fluttuazioni quantistiche creano una coppia di stringhe virtuali, che dopo aver percorso un brevissimo tratto si annichilano nel punto c, producendo di nuovo una stringa unica. Infine, nel punto d, questa stringa cede la sua energia dissociandosi in un due stringhe, ciascuna delle quali prosegue il suo cammino in una nuova direzione. A causa della presenza di un solo buco - o anello (loop) - nel centro della figura 12-4, i fisici chiamano questo tipo di interazione «processo a un loop» *(one-loop process).* Come nel caso dell'interazione rappresentata nella figura 12-3, anche a questo diagramma è possibile associare una formula matematica precisa, che tiene conto dell'effetto prodotto dalla coppia di stringhe virtuali sul moto delle due stringhe iniziali.

Ma la storia non finisce certo qui: le fluttuazioni quantistiche possono generare un'intera sequenza di coppie di stringhe virtuali. Abbiamo cosí diagrammi con un numero sempre maggiore di buchi, come nella figura 12.5. Ciascuno di questi diagrammi rappresenta un mezzo semplice e pratico di sintetizzare il corrispondente processo fisico: le due stringhe iniziali si fondono in una stringa unica, le fluttuazioni quantistiche fanno sí che questa si divida in una coppia di stringhe virtuali, che percorrono un breve tratto e si annichilano l'un l'altra fondendosi in una stringa unica, che percorre un breve tratto e produce un'altra coppia di stringhe virtuali, e cosí di seguito. Come per i diagrammi precedenti, esiste una formula matematica per ciascuno di questi processi a piú loop, che esprime l'effetto complessivo della sequenza di coppie di stringhe virtuali sul moto delle due stringhe iniziali.[4] Questi diagrammi sono, in teoria delle stringhe, l'analogo dei diagrammi di Feynman, inventati da Richard Feynman per effettuare calcoli perturbativi nella teoria quantistica di campo delle particelle elementari.

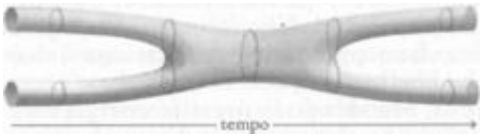

Figura 12.3.
Le stringhe interagiscono unendosi e dividendosi.

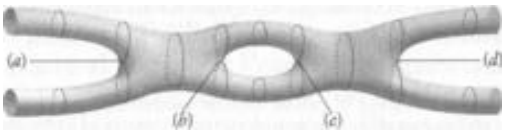

Figura 12.4

La « frenesia » quantistica imposta dal principio di indeterminazione fa sí che si crei una coppia stringa/antistringa (b), che subito si annichila (c), dando luogo a un'interazione piú complicata.

Nello stesso modo in cui il meccanico stabilisce l'ammontare finale del conto che dovete pagare per le riparazioni alla vostra automobile facendo una stima iniziale di 1.800.000 lire e quindi precisando questo preventivo con «raffinamenti» successivi di 100.000 lire, 54.000 lire, 20.000 lire e 1.800 lire, e nello stesso modo in cui è possibile calcolare con precisione sempre maggiore il moto della Terra correggendo l'orbita dovuta al solo influsso del Sole con «raffinamenti» successivi che tengono conto degli effetti gravitazionali della Luna e degli altri pianeti, cosí i fisici teorici riescono a descrivere l'interazione di due stringhe sommando la formula matematica per il diagramma senza buchi (nessuna coppia di stringhe virtuali, nessun loop) prima con quella per il diagramma con un buco (una sola coppia di stringhe virtuali, un solo loop), poi con quella per il diagramma con due buchi (due coppie di stringhe virtuali, due loop) e cosí via all'infinito (vedi figura 12.6).

Per il calcolo esatto sarebbe necessario sommare insieme tutte le espressioni matematiche corrispondenti a questi diagrammi di interazione, con un numero di buchi sempre piú grande. Ma questo è un compito impossibile, poiché esistono infiniti diagrammi di questo tipo e i calcoli matematici diventano tanto piú difficili quanti piú sono i buchi. I teorici delle stringhe hanno dunque affrontato il problema in modo perturbativo, assumendo che una buona approssimazione iniziale sia fornita dai processi a zero loop, mentre i diagrammi con piú buchi danno luogo a «raffinamenti» successivi, sempre piú piccoli a mano a mano che aumenta il numero di loop.

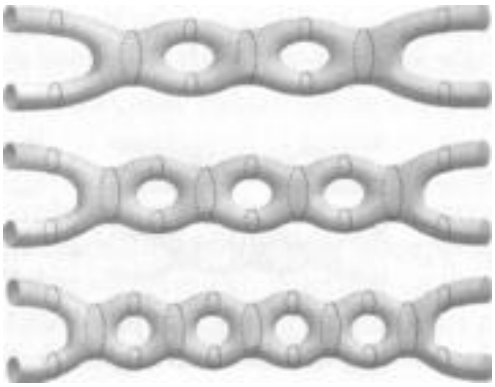

Figura 12.5.
La frenesia quantistica fa sí che si creino e si annichilino numerose coppie di stringa/antistringa

In verità, i fisici hanno scoperto quasi tutto ciò che sappiamo della teoria delle stringhe - e non fanno eccezione gli argomenti trattati nei capitoli precedenti - eseguendo complicati e laboriosi calcoli perturbativi. Ma per poterci fidare della validità del risultato ottenuto dobbiamo essere sicuri che le approssimazioni che trascurano tutti i diagrammi della figura 12.6 eccetto il primo siano davvero attendibili come abbiamo supposto. Eccoci giunti alla questione cruciale: le nostre approssimazioni sono azzeccate?

5. Sono azzeccate le nostre approssimazioni?

Dipende. Sebbene la formula matematica associata a ogni diagramma diventi molto complicata all'aumentare del numero dei buchi (e quindi dei loop), i fisici teorici hanno evidenziato una caratteristica fondamentale. Piú o meno nello stesso modo in cui la robustezza di una fune determina la probabilità che questa si spezzi in due quando viene tesa e scossa con forza, c'è un numero che determina la probabilità che una stringa si divida in due a causa della momentanea comparsa di una coppia di stringhe virtuali, dovuta alle fluttuazioni quantistiche. Questo numero si chiama *costante di accoppiamento di stringa* (per la precisione, ciascuna delle cinque teorie di stringa ha la sua propria costante di accoppiamento, come vedremo tra poco), Il nome si spiega da sé: la costante di accoppiamento di stringa descrive quanto strettamente sono correlate - accoppiate, *si* potrebbe anche dire - le fluttuazioni quantistiche delle tre stringhe (la stringa iniziale e le due stringhe virtuali in cui si divide). Il formalismo matematico mostra che quanto piú grande è la costante di accoppiamento di stringa tanto maggiore è la probabilità che le fluttuazioni quantistiche facciano sí che la stringa iniziale si divida in due (per poi formare nuovamente una stringa unica); quanto piú piccola è la costante di accoppiamento di stringa tanto minore è la probabilità che si crei una coppia di stringhe virtuali.

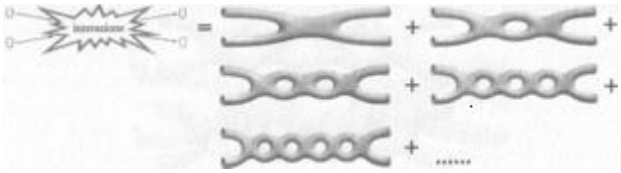

Figura 12.6.
L'interazione di due stringhe si calcola sommando diagrammi con un numero crescente di buchi (loop).

Prima di affrontare brevemente il problema di come si determini il valore della costante di accoppiamento per ciascuna delle cinque teorie di stringa, dobbiamo capire che cosa significhi «grande» e «piccolo» quando ci riferiamo alle dimensioni di questa costante. La matematica che sta alla base della teoria delle stringhe mostra che il punto di separazione tra «piccolo» e «grande» è il numero 1, nel senso che ora spieghiamo. Se la costante di accoppiamento di stringa vale meno di 1, allora la probabilità che si creino coppie di stringhe virtuali diventa tanto minore quanto maggiore è il numero di tali coppie. Al contrario, se la costante di accoppiamento di stringa è maggiore o uguale a 1, la probabilità che irrompano sulla scena coppie virtuali diventa tanto maggiore quanto maggiore è il numero di tali coppie.[5] Per essere piú precisi, ogni coppia di stringhe virtuali, che corrisponde a un loop in un dato diagramma di Feynman, dà un contributo - oltre ad altri termini piú complicati ~ che contiene la costante di accoppiamento come fattore moltiplicativo. Avere molti loop significa dunque moltiplicare la costante di accoppiamento con se stessa molte volte. Se la costante di accoppiamento di stringa è minore di uno, l'iterazione delle moltiplicazioni fa diventare sempre piú piccolo il contributo totale, mentre se è 1 o maggiore di 1, il contributo totale rimane invariato oppure diventa sempre piú grande.

Di conseguenza, se la costante di accoppiamento è minore di 1, i contributi dei diagrammi con piú buchi diventano sempre piú trascurabili all'aumentare del numero di buchi. Questo fatto indica che otterremo risultati ragionevolmente precisi anche tenendo conto soltanto dei processi a pochi loop e trascurando tutti gli altri, e dimostra perciò la validità del metodo perturbativo. Se invece la costante di accoppiamento di stringa non è minore di 1, i contributi dei processi a piú loop diventano piú rilevanti all'aumentare del numero di loop. Ciò significa che il metodo perturbativo non si può applicare, proprio come avviene nel caso del sistema costituito da tre stelle dello stesso ordine di grandezza. L'approssimazione che supponevamo azzeccata - il processo a un solo loop - si rivela invece completamente sballata. (Quanto abbiamo appena detto vale per tutte e cinque le teorie di stringa - l'efficacia dell'approccio perturbativo è determinata, caso per caso, dal valore della costante di accoppiamento di ciascuna teoria).

Arriviamo cosí alla seconda questione cruciale: qual è il valore della costante di accoppiamento di stringa? (Per essere precisi, dovremmo domandarci qual è il valore della costante di accoppiamento in ciascuna delle cinque diverse teorie di stringa). *Nessuno sa dare oggi una risposta a tale questione,* che costituisce uno dei piú importanti problemi aperti della teoria delle stringhe. L'unica cosa di cui possiamo essere certi è che i risultati basati sull'approccio perturbativo sono giustificati solo se la costante di accoppiamento è minore di 1. Oltre a ciò, l'esatto valore della costante di accoppiamento di stringa influisce direttamente sulle masse e sulle cariche associate ai vari modi di vibrazione di stringa. Come si vede, molta fisica dipende in maniera sostanziale dal valore di questa costante di accoppiamento. Per tale ragione, vale la pena di indagare piú a fondo come mai la determinazione del suo valore rimanga un problema irrisolto in tutte e cinque le teorie.

6. Le equazioni della teoria delle stringhe.

Il metodo perturbativo, oltre a determinare come due stringhe interagiscono l'una con l'altra, si può anche usare per ricavare le equazioni fondamentali della teoria di stringa. In effetti, le equazioni della teoria di stringa determinano come interagiscono le stringhe e, viceversa, il modo in cui interagiscono le stringhe determina le equazioni della teoria.

Tanto per cominciare, in ciascuna delle cinque teorie dì stringa esiste un'equazione che dovrebbe determinare il valore della costante di accoppiamento della teoria. I fisici, tuttavia, sono finora riusciti a ricavare soltanto una forma approssimata di questa equazione, in ciascuna delle cinque teorie di stringa, calcolando con procedimenti perturbativi un numero ridotto di diagrammi di stringa. Ecco che cosa ci dice questa forma approssimata dell'equazione: in ciascuna delle cinque teorie di stringa, il valore della costante di accoppiamento è un numero che moltiplicato per zero dà zero come risultato. Nessuna equazione potrebbe essere piú deludente di questa: dato che ogni numero moltiplicato per zero fa zero, la soluzione dell'equazione può essere qualsiasi valore della costante di accoppiamento. In conclusione, in tutte e cinque le teorie di stringa, l'equazione approssimata per la costante di accoppiamento non ci dà assolutamente nessuna informazione sul suo possibile valore.

Già che ci siamo, vorrei osservare che in ciascuna delle cinque teorie di stringa esiste un'altra equazione, che si ritiene possa determinare la forma precisa sia delle dimensioni spaziali estese sia di quelle compattificate. Di questa equazione, siamo riusciti a ricavare una versione approssimata che è molto piú restrittiva dell'equazione approssimata relativa alla costante di accoppiamento di stringa, per quanto ammetta anch'essa molte soluzioni. Un'intera classe di soluzioni, ad esempio, è data dalla combinazione di quattro dimensioni spaziotemporali con un qualunque spazio di Calabi-Yau a sei dimensioni (tutte compattificate), ma esistono altre possibilità, che prevedono anche numeri diversi di dimensioni estese e compattificate.[6] Per il lettore provvisto di una buona preparazione matematica, precisiamo che tali equazioni asseriscono che lo spaziotempo deve ammettere una metrica la cui curvatura di Ricci è nulla. Se decomponiamo lo spaziotempo nel prodotto cartesiano dello spaziotempo quadridimensionale di Minkowski e di una varietà di Káhler a sei dimensioni, il fatto che la curvatura di Ricci sia uguale a zero implica che la varietà di Káhler sia di Calabi-Yau. E questa la ragione per cui gli spazi di Calabi-Yau hanno una primaria importanza nella teoria delle stringhe.

Quali conclusioni possiamo trarre da questi risultati? Ci sono tre possibilità. Primo - cominciando con la prospettiva piú pessimistica - sebbene ogni teoria di stringa abbia il pregio di contenere in sé alcune equazioni potenzialmente capaci di determinare il valore della sua costante di accoppiamento, nonché il numero di dimensioni e la forma geometrica dello spaziotempo (una qualità che nessun'altra teoria può vantare), anche la forma esatta - finora ignota - di queste equazioni può ammettere un ampio spettro di soluzioni diverse, indebolendo cosí fortemente il loro valore predittivo. Se ciò fosse vero, la teoria delle stringhe subirebbe uno scacco: il suo assunto è di riuscire a spiegare queste caratteristiche dell'universo, senza richiederci di dedurle da osservazioni sperimentali e di inserirle, in modo piú o meno arbitrario, nella teoria. Torneremo a parlare di questa possibilità nel capitolo XV. Secondo, l'indesiderata flessibilità della teoria delle stringhe potrebbe essere l'indizio della presenza di qualche sottile fallacia nel nostro ragionamento. Stiamo tentando di usare metodi perturbativi per determinare il valore della costante di accoppiamento stessa. Ma questi metodi sono attendibili, come abbiamo visto, soltanto se la costante di accoppiamento è minore di 1; di conseguenza il calcolo potrebbe essere basato su una supposizione priva di una giustificazione a priori, cioè che il risultato da ottenere sarà minore di 1.I nostri insuccessi potrebbero forse essere la prova che questa assunzione è davvero errata e che le costanti di accoppiamento delle cinque teorie di stringa sono tutte maggiori di 1. Terzo, questa indesiderata flessibilità potrebbe derivare semplicemente dal fatto che usiamo equazioni approssimate invece di equazioni esatte. Ad esempio, sarebbe concepibile che la costante di accoppiamento in una data teoria di stringa fosse minore di 1, ma che le equazioni della teoria dipendessero in modo sensibile dai contributi di tutti i diagrammi. In altre parole, i piccoli «raffinamenti» dovuti a diagrammi con un numero di buchi (loop) sempre maggiore potrebbero avere un effetto cumulativo capace di modificare le equazioni approssimate - che ammettono molte soluzioni - in equazioni esatte di gran lunga piú restrittive.

All'inizio degli anni novanta, queste ultime due possibilità resero chiaro alla maggior parte dei fisici teorici che l'esclusivo ricorso a metodi perturbativi costituiva un serio ostacolo per i progressi futuri. Quasi tutti gli specialisti del settore concordavano sul fatto che l'avanzamento della teoria avrebbe richiesto l'uso di metodi non perturbativi metodi, cioè, che essendo svincolati dalle tecniche di approssimazione fossero in grado di superare le limitazioni insite

nell'approccio perturbativo. Nel *1994* riuscire a realizzare questo programma sembrava una chimera. Ma a volte anche le chimere possono diventare reali.

7. Dualità.

Ogni anno, centinaia di teorici delle stringhe provenienti da ogni angolo del mondo si riuniscono in convegno per fare il punto sui risultati dell'anno precedente e valutare comparativamente le possibili direzioni di ricerca. A seconda dei progressi compiuti durante l'anno, non è difficile prevedere quale sarà il livello di interesse dei partecipanti e quanto alte saranno le loro aspettative. Alla metà degli anni ottanta, nel pieno rigoglio della prima rivoluzione delle superstringhe, in questi congressi regnava un'incondizionata euforia: quasi tutti i fisici condividevano la speranza che sarebbero in breve riusciti a comprendere tutto della teoria delle stringhe e che questa si sarebbe rivelata la teoria ultima dell'universo. Con il senno di poi, possiamo dire che questo ottimismo era davvero ingenuo. Come abbiamo imparato a nostre spese negli anni successivi, per riuscire a capire molti aspetti difficili e profondi della teoria delle stringhe servirà ancora una gran mole di lavoro. Ma quelle prime aspettative cosí poco realistiche ebbero l'effetto di produrre una violenta reazione negativa: vedendo che i problemi tardavano a trovare una soluzione, molti ricercatori si sentirono profondamente demoralizzati. L'atmosfera che si respirava ai congressi della fine degli anni ottanta rifletteva questa disillusione generalizzata: i fisici presentavano sí nuovi interessanti risultati, ma il sacro fuoco era spento. Alcuni arrivarono perfino a suggerire che la consuetudine di riunirsi annualmente in convegno avrebbe dovuto essere sospesa. All'inizio degli anni novanta le cose iniziarono a migliorare. Diversi importanti progressi -alcuni dei quali abbiamo illustrato nei capitoli precedenti - contribuirono a ridare slancio alla teoria delle stringhe e i fisici riacquistarono una parte del loro entusiasmo e ottimismo. Ben pochi, tuttavia, potevano prevedere quel che sarebbe accaduto al congresso di Fisica delle stringhe che si svolse presso la University of Southern California nel marzo del *1995*

Quando arrivò il suo turno, Edward Witten salì sul podio e prese la parola: la sua conferenza fu la scintilla che innescò la seconda rivoluzione delle superstringhe. Prendendo ispirazione da articoli precedenti di Duff, Hull, Towsend e avvalendosi di alcune idee di Schwarz, del fisico indiano Ashoke Sen e di altri, Witten delineò una strategia per superare le limitazioni imposte dai metodi perturbativi nella teoria delle stringhe. Nel suo programma, aveva un ruolo centrale il concetto di dualità.

I fisici usano il termine dualità per riferirsi a modelli teorici che, pur apparendo del tutto diversi, descrivono esattamente la stessa fisica. Ci sono esempi banali di dualità, in cui teorie apparentemente diverse sono in realtà perfettamente identiche, la loro diversità essendo dovuta soltanto al linguaggio che abbiamo scelto per presentarle. Chi capisce soltanto l'italiano potrebbe stentare a riconoscere nella relatività generale la teoria di Einstein se gli venisse presentata in cinese. Un fisico che conosce entrambe le lingue, tuttavia, stabilirà facilmente l'equivalenza delle due teorie, facendo una semplice traduzione. Definiamo « banale » un esempio di questo genere perché, dal punto di vista della fisica, la traduzione non apporta nulla di nuovo. Se qualcuno che conosce sia l'italiano che il cinese stesse affrontando una difficile questione di relatività generale, il problema rimarrebbe altrettanto arduo, indipendentemente dalla lingua in cui decidesse di formularlo. Passare dall'italiano al cinese, o viceversa, non ci suggerisce nuove idee fisiche.

Esempi non banali di dualità sono invece quelli in cui differenti descrizioni della stessa situazione fisica ci forniscono sia interpretazioni fisiche, sia strumenti matematici diversi e complementari. Nelle pagine precedenti ci siamo già imbattuti in due esempi di dualità. Nel capitolo *X* abbiamo osservato che, dal punto di vista della teoria delle stringhe, un universo che ha una dimensione circolare di raggio *R* può essere descritto altrettanto bene come un universo che ha una dimensione circolare di raggio *1/R.* Sebbene queste due situazioni geometriche siano diverse, le proprietà delle stringhe implicano che siano fisicamente identiche. La simmetria speculare è un secondo esempio di dualità. In questo caso, due modi differenti di compattificare le sei dimensioni extra in uno spazio di Calabi-Yau - due universi che a prima vista non hanno niente a che spartire l'uno con l'altro -risultano avere le stesse identiche proprietà fisiche. I due spazi di CalabiYau forniscono descrizioni duali dello stesso universo. Ed è di cruciale importanza il fatto che queste descrizioni duali - a differenza di quel che accade per il passaggio dal cinese all'italiano - suggeriscono e permettono di provare nuove idee fisiche nella teoria delle stringhe, quali l'esistenza di un valore minimo per le dimensioni circolari o la possibilità di transizioni che modificano la topologia.

Nella sua conferenza al congresso del 1995, Witten addusse prove convincenti a sostegno di una nuova dualità, ben

piú profonda. Come abbiamo accennato all'inizio di questo capitolo, Witten suggerì l'idea che le cinque teorie di stringa, per quanto palesemente differenti nella loro struttura di base, siano soltanto modi diversi di descrivere la stessa fisica. Invece di cinque teorie diverse, insomma, avremmo semplicemente cinque finestre diverse che si aprono sul medesimo paesaggio teorico.

Prima degli sviluppi della teoria delle stringhe alla metà degli anni novanta, la possibilità di una cosí grandiosa versione della dualità era una di quelle idee che un fisico può benissimo coltivare nel fondo del suo cuore, ma delle quali accetterà di parlare solo molto raramente, tanto sembrano utopistiche. Se due teorie di stringa differiscono per molti aspetti significativi della loro struttura interna, è difficile credere che possano essere soltanto diverse descrizioni della stessa realtà fisica. Ciò nonostante, abbiamo un numero sempre crescente di indizi che ci mostrano che tutte e cinque le teorie di stringa sono duali. Oltre a ciò, come vedremo piú avanti, Witten sostenne con argomentazioni convincenti che si dovesse tirare in ballo anche una sesta teoria.

Queste idee sono strettamente collegate alla questione dell'applicabilità dei metodi perturbativi, che abbiamo trattato alla fine del paragrafo precedente. La ragione di questo legame sta nel fatto che le cinque teorie di stringa sono palesemente differenti quando ciascuna di esse è *debolmente accoppiata - un'espressione* che significa che la costante di accoppiamento di una teoria è minore di 1. Proprio perché facevano assegnamento sui soli metodi perturbativi, i fisici non hanno saputo per vari anni come affrontare il problema di specificare quali proprietà avrebbe avuto una teoria di stringa fortemente accoppiata (cioè con costante di accoppiamento maggiore di 1). Witten e altri sostengono che ora è possibile risolvere questo problema. I risultati da loro ottenuti suggeriscono in modo convincente che, se si aggiunge alle cinque precedenti una sesta teoria di stringa che dobbiamo ancora descrivere, allora il regime di accoppiamento forte di ciascuna di queste teorie ha una descrizione duale in termini del regime di accoppiamento debole di un'altra teoria e viceversa.

Per riuscire a dare un senso piú concreto a quanto abbiamo appena detto, potrebbe esservi di aiuto la seguente analogia. Immaginiamo due tizi che conducono una vita piuttosto ritirata. A uno dei due piace il ghiaccio, ma -per quanto strano possa essere - non ha mai visto l'acqua (nella sua forma liquida, intendo). All'altro piace l'acqua ma non gli è mai capitato - il che non è meno strano - di vedere il ghiaccio. I due si incontrano per caso e decidono di partire insieme per un campeggio nel deserto. Al momento di mettersi in viaggio, rimangono entrambi affascinati dall'equipaggiamento dell'altro. L'amante del ghiaccio è incantato dal mobile liquido trasparente dell'amante dell'acqua, mentre quest'ultimo sente una curiosa attrazione per i meravigliosi cubetti di cristallo che l'amante del ghiaccio porta con sé. Nessuno dei due ha il piú vago sospetto che tra acqua e ghiaccio ci sia uno stretto legame; per entrambi si tratta di sostanze completamente diverse. Quando si ritrovano sotto il sole cocente del deserto, rimangono perciò molto turbati vedendo che il ghiaccio si tramuta lentamente in acqua. E durante la gelida notte del deserto non sono meno sconvolti scoprendo che l'acqua a poco a poco si solidifica e diventa ghiaccio. Capiscono cosí che queste due sostanze - che inizialmente credevano fossero prive di qualsiasi relazione reciproca - sono invece strettamente collegate.

La dualità tra le cinque teorie di stringa è per alcuni versi simile all'esempio precedente: molto approssimativamente, le costanti di accoppiamento di stringa svolgono un ruolo analogo a quello della temperatura nel deserto. Come l'acqua e il ghiaccio, due teorie di stringa, scelte tra le cinque possibili, sembrano di primo acchito completamente diverse. Ma se facciamo variare le loro costanti di accoppiamento, ecco che le teorie trasmutano l'una nell'altra. Proprio come il ghiaccio si trasforma in acqua se aumentiamo la sua temperatura, una teoria di stringa si può trasformare in un'altra se aumentiamo il valore della sua costante di accoppiamento. Questa idea ci fa compiere un importante passo avanti nel nostro tentativo di mostrare che tutte le teorie di stringa sono descrizioni duali di un'unica struttura di base - l'analogo di H_2O nel caso dell'acqua.

Il ragionamento che conduce a questi risultati si basa quasi interamente su argomentazioni che sfruttano i principi di simmetria, di cui ora parleremo.

8. Il potere della simmetria.

Per anni, l'impresa di studiare le proprietà di una delle cinque teorie di stringa per valori grandi della sua costante di accoppiamento non fu nemmeno tentata, dato che nessuno aveva la minima idea di come si potesse procedere senza i metodi perturbativi. Tra la fine degli anni ottanta e l'inizio degli anni novanta, tuttavia, i fisici compirono alcuni progressi,

lenti ma costanti, nell'identificare certe particolari prerogative (ad esempio, certe masse e cariche di gauge) che siano tipiche della fisica di una data teoria di stringa fortemente accoppiata ma rientrino nondimeno nelle nostre capacità di calcolo. La determinazione di queste proprietà, che per forza di cose trascende lo schema perturbativo, ha svolto un ruolo cruciale nel dare avvio alla seconda rivoluzione delle superstringhe e si fonda sul potere dei principi di simmetria.

I principi di simmetria si rivelano strumenti assai efficaci per penetrare numerosi aspetti del mondo fisico. Abbiamo già osservato, ad esempio, che la convinzione che le leggi della fisica trattino alla stessa stregua tutti i luoghi dell'universo e tutti gli istanti passati e futuri, ci permette di dedurre che le leggi che governano il «qui» e l'«ora» sono le medesime valide dovunque e sempre. Questo è un esempio di proporzioni grandiose, ma i principi di simmetria trovano applicazione anche in circostanze piú modeste e piú limitate. Supponete, ad esempio, di essere testimoni di un crimine ma di riuscire a scorgere soltanto il lato destro del volto del malfattore: la polizia investigativa può comunque avvalersi della vostra descrizione per abbozzare un identikit, usando un semplice ragionamento di simmetria. Infatti, sebbene sussistano sempre alcune piccole differenze tra la parte destra e quella sinistra del volto di una persona, in generale questo è sufficientemente simmetrico perché si possa ottenere una buona approssimazione di una delle due parti capovolgendo l'immagine dell'altra.

In ciascuno di questi due esempi assai diversi, il potere della simmetria sta nella sua capacità di determinare con esattezza certe proprietà in maniera *indiretta,* un sistema questo che spesso si dimostra ben piú facile dei metodi diretti. Certo, potreste studiare la fisica della galassia di Andromeda andando personalmente fin laggiù, trovando un pianeta che orbita intorno a qualche stella, costruendo degli acceleratori di particelle e compiendo lo stesso tipo di esperimenti che si fanno qui sulla Terra. Ma il metodo indiretto di invocare il principio di simmetria rispetto a cambiamenti di posizione è di gran lunga piú facile. Potreste anche determinare le fattezze della parte sinistra del volto del criminale acciuffandolo e osservandolo poi con calma. Ma appellarsi al principio di simmetria destra-sinistra dei volti umani è in genere molto piú agevole.[7] Naturalmente, niente garantisce la fondatezza di questi metodi indiretti. Ad esempio, proprio come alcuni volti non sono perfettamente simmetrici, potrebbe darsi che, in qualche remota regione dell'universo, le leggi fisiche siano differenti da quelle che conosciamo. Discuteremo di questa possibilità nel capitolo XIV.

La supersimmetria è un principio di simmetria piú astratto, che mette in relazione proprietà fisiche di costituenti elementari della materia che hanno numeri di spin diversi. Nella migliore delle ipotesi, disponiamo soltanto di vaghe indicazioni, derivanti dai risultati sperimentali, dalle quali dedurre che il mondo microscopico sia effettivamente governato da questa simmetria; ciò nonostante la maggior parte di fisici è convinta che le cose stiano proprio cosí. Di certo, la supersimmetria costituisce parte integrante della teoria delle stringhe, e negli anni novanta si è arrivati a capire, sviluppando alcune idee innovatrici di Nathan Seiberg dell'Institute for Advanced Study, che essa fornisce un efficace strumento per affrontare con metodi indiretti numerosi problemi di grande difficoltà e importanza.

Il fatto stesso che una teoria debba rispettare le leggi della supersimmetria ci permette di imporre delle significative restrizioni a priori sulle proprietà che essa può avere, anche senza capire in dettaglio quale sia la sua struttura. Per ricorrere a un'analogia linguistica, immaginiamo che vi dicano che su un foglietto, chiuso in una busta sigillata, è stata scritta una sequenza di lettere, nella quale compare esattamente tre volte la lettera «u». In mancanza di altre informazioni, non avete modo di indovinare quale sia la sequenza di lettere; per quel che ne sapete, potrebbe benissimo essere una successione di lettere del tutto casuale, come « mvcfolziuridqfpzueuhbtb » o una qualunque delle altre infinite possibilità. Ma supponiamo che vi diano due indizi: la sequenza di lettere da scoprire forma una parola italiana di senso compiuto ed è la parola con il minimo numero di lettere a contenere tre u. Di tutte le infinite sequenze di lettere, questi due indizi vi lasciano una sola possibilità - la piú corta parola italiana a contenere tre u: «urubú».

In modo analogo, anche la supersimmetria ci dà degli indizi che «vincolano» le teorie che obbediscono ai suoi principi ad avere determinate proprietà. Per farci un'idea di come funzionano le cose, immaginiamo di dover risolvere un piccolo rompicapo fisico, simile in qualche modo all'enigma linguistico che abbiamo appena descritto. Dentro una scatola è nascosto qualcosa - la natura di questo <qualcosa» non è specificata - che possiede una certa carica. Questa carica potrebbe essere elettrica, magnetica o una qualsiasi altra carica di gauge, ma, per essere concreti, supponiamo che si tratti di tre unità di carica elettrica. In mancanza di altre informazioni, non c'è modo di indovinare che cosa sia nascosto nella scatola. Potrebbero esserci tre particelle di carica 1, come protoni o positroni, oppure quattro particelle di carica 1 e una particella di carica -1 (come l'elettrone), dato che la carica complessiva di questa combinazione è uguale a tre; ma potrebbero anche esserci nove particelle di carica un terzo (come il quark anti-down) oppure le stesse nove particelle

insieme a un numero qualsiasi di particelle prive di cariche (come i fotoni). Insomma, ci sono infinite possibilità, proprio come nel caso della sequenza di lettere.

Supponiamo però di avere altri due indizi, come nel rompicapo linguistico: la teoria che descrive l'universo - e dunque anche il contenuto della scatola -è supersimmetrica; il contenuto della scatola ha la massa minima compatibile con il requisito di avere tre unità di carica. Basandosi su un'idea di Eugene Bogomol'nyi, Manoj Prasad e Charles Sommerfield, i fisici hanno mostrato che la specificazione di un rigido schema di strutturazione (lo schema della supersimmetria, analogo allo schema della lingua italiana) e di un «vincolo di minimalità» (il vincolo della massa minima per un dato valore della carica elettrica, analogo al vincolo della parola di lunghezza minima contenente un dato numero di «u») è sufficiente a determinare in modo univoco la natura dell'oggetto misterioso contenuto nella scatola. In altre parole, basta assumere che il contenuto della scatola sia il piú leggero possibile e abbia la carica prescritta, per poterlo identificare senza alcuna ambiguità. Le configurazioni di massa minima per un assegnato valore della carica si chiamano *stati BPS,* in onore ai loro tre scopritori.[8] Il lettore esperto avrà chiaro che queste asserzioni richiedono la cosiddetta supersimmetria N= *2.*

Le proprietà degli stati *BPS* - ed è questo il punto cruciale - si possono ricavare in maniera univoca, facile e precisa, senza ricorrere a calcoli perturbativi. E ciò è vero indipendentemente dal valore delle costanti di accoppiamento. In altri termini, anche se la costante di accoppiamento è maggiore di 1 e, di conseguenza, i metodi perturbativi non sono validi, riusciamo ugualmente a determinare con esattezza le proprietà delle configurazioni *BPS.* Tali proprietà vengono spesso chiamate masse e cariche *non perturbative,* dato che i loro valori eludono le limitazioni dell'approccio perturbativo. Per questo motivo, se volete, l'acronimo *BPS* potrebbe anche significare *beyond perturbative states,* vale a dire «oltre gli stati perturbativi».

Sebbene le proprietà *BPS* costituiscano soltanto una piccola parte di tutta la fisica di una data teoria di stringa fortemente accoppiata, ci permettono comunque di farci un'idea di alcune sue caratteristiche essenziali. Ogni volta che il valore della costante di accoppiamento oltrepassa i confini di applicabilità dei metodi perturbativi, gli stati *Bps* rimangono la nostra unica ancora di salvezza. E ci possono essere di grande aiuto, come in un idioma straniero poche parole accuratamente selezionate.

9. Dualità nelle teorie di stringa.

Seguendo Witten, consideriamo ora una delle cinque teorie di stringa, ad esempio quella di tipo I, e supponiamo che tutte le sue nove dimensioni spaziali siano piatte e non arrotolate. Questa ipotesi, naturalmente, non è realistica e ha il solo scopo di semplificare l'esposizione; le dimensioni compattificate ricompariranno tra breve. Assumiamo, per cominciare, che la costante di accoppiamento di stringa sia molto minore di *1.* I metodi perturbativi sono dunque validi e molte caratteristiche della teoria possono essere cosí determinate con precisione. Se aumentiamo il valore della costante di accoppiamento mantenendolo però molto al di sotto di 1, possiamo ancora usare l'approccio perturbativo. Le caratteristiche della teoria cambieranno leggermente - per esempio, il valore numerico associato allo scattering di due stringhe risulterà un po' diverso a causa del fatto che i processi a piú loop della figura *12.6* danno contributi maggiori se la costante di accoppiamento aumenta. Ma, ad eccezione di queste piccole variazioni nelle specifiche proprietà numeriche, il contenuto fisico complessivo della teoria rimane lo stesso, fintanto che la costante di accoppiamento non esce dal settore perturbativo.

Se il valore della costante di accoppiamento della stringa di tipo I supera il valore 1, i metodi perturbativi cessano di essere validi e non ci resta altro che concentrare la nostra attenzione sul ristretto insieme delle masse e delle cariche non perturbative - gli stati *BPS - che* siamo capaci malgrado tutto di calcolare. Ecco l'idea sostenuta da Witten, che successivamente ha trovato conferma in un lavoro dello stesso Witten insieme con Joe Polchinski della University of California: *queste proprietà della teoria di stringa di tipo I fortemente accoppiata coincidono precisamente con proprietà note della teoria di stringa eterotica-O per valori piccoli della sua costante di accoppiamento.* Questa corrispondenza costituisce una convincente indicazione del fatto che queste due teorie, che a prima vista sembrano del tutto differenti - come acqua e ghiaccio - sono in realtà duali. La conclusione che ci viene suggerita è infatti che la fisica della teoria di tipo 1 per valori grandi della sua costante di accoppiamento è *identica* alla fisica della teoria eterotica-O per valori piccoli della sua costante di accoppiamento. Argomentazioni analoghe provano in modo altrettanto convincente che anche il contrario

è vero: la fisica della teoria di tipo I per valori piccoli della sua costante di accoppiamento è identica a quella della teoria eterotica-O per valori grandi della sua costante di accoppiamento.[9] Per essere un po' piú precisi, se indichiamo con *gHO* la costante di accoppiamento della teoria di stringa eterotica-O e con *gI* quella della teoria di tipo I, le due teorie sono identiche se vale la relazione *gI = 1/gHO* (che è equivalente a *gHO = 1/gI).* Di conseguenza, se una costante è minore di 1, l'altra è maggiore di 1.

Sebbene sembri non sussistere alcuna relazione tra queste due teorie di stringa quando le esaminiamo avvalendoci di metodi perturbativi, scopriamo ora che ciascuna delle due si trasforma nell'altra - un po' come il ghiaccio si tramuta in acqua e viceversa - quando facciamo variare il valore delle loro costanti di accoppiamento.

Questo nuovo e importante risultato, secondo cui la fisica di una teoria fortemente accoppiata è descritta dalla fisica di un'altra teoria debolmente accoppiata, è conosciuto sotto il nome di *dualità di accoppiamento fortedebole.* Anche questo tipo di dualità, come gli altri di cui abbiamo parlato, ci dice che le due teorie non sono in realtà distinte, pur fornendo due descrizioni non equivalenti di una stessa teoria piú fondamentale. A differenza della dualità banale italiano-cinese, la dualità di accoppiamento forte-debole si rivela uno strumento potente. Quando la costante di accoppiamento di una delle due teorie di una coppia duale è piccola, possiamo analizzare le sue proprietà usando i consueti e ben consolidati metodi perturbativi. Ma se la costante di accoppiamento della teoria è maggiore di 1 e l'approccio perturbativo non funziona piú, sappiamo ora che possiamo passare alla descrizione duale - fornita da una teoria la cui costante di accoppiamento è invece minore di 1 - e ricondurci cosí, anche in questo caso, all'uso di strumenti perturbativi. Questa traduzione da una teoria all'altra è vantaggiosa perché ci permette di disporre di metodi quantitativi per analizzare una teoria che ritenevamo inizialmente al di là della nostra portata concettuale.

A dire il vero, la dimostrazione del fatto che la fisica della teoria di stringa di tipo I fortemente accoppiata è identica alla fisica della teoria di stringa eterotica-O debolmente accoppiata, e viceversa, è un compito estremamente difficile, che i fisici teorici non sono ancora riusciti a portare a termine. Ed è facile capire il perché: non possiamo usare i metodi perturbativi per analizzare entrambe le teorie, dato che una delle due ha costante di accoppiamento maggiore di 1. (A ben riflettere, è proprio questa intrinseca difficoltà a rendere cosí importante la dualità di accoppiamento forte-debole, che - se fosse vera - ci darebbe appunto un nuovo strumento per studiare le proprietà di una teoria di stringa fortemente accoppiata: basta passare alla descrizione duale e usare i metodi perturbativi).

Ma anche se non riusciamo a dimostrare che le due teorie sono duali, la concordanza perfetta tra tutte quelle proprietà che sappiamo derivare con sicurezza costituisce un'indicazione stringente del fatto che debba sussistere una relazione di accoppiamento forte-debole tra le teorie di stringa di tipo 1 ed eterotica-O. In effetti, tutti i calcoli, sempre piú ingegnosi, che si sono finora eseguiti per verificare questa presunta dualità hanno sempre dato risultati positivi. La maggior parte dei fisici teorici è convinta che la dualità sia vera.

Seguendo la stessa idea di base, è possibile studiare le proprietà di accoppiamento forte di altre teorie di stringa, ad esempio quella di tipo IIB. In questo caso accade qualcosa di non meno straordinario, come congetturarono per primi Hull e Towsend; un'ipotesi che ha successivamente trovato conferma nelle ricerche di numerosi fisici. Quando la costante di accoppiamento della teoria di stringa di tipo IIB diventa sempre piú grande, le proprietà fisiche che riusciamo ancora a calcolare concordano precisamente con quelle della teoria di tipo IIB stessa, ma debolmente accoppiata. In altri termini, la teoria di stringa di tipo IIB è auto-duale.[10] Questa dualità ha una stretta analogia con quella tra *R* e *1/R* discussa nel capitolo X. Indicando con *gIIB* la costante di accoppiamento della stringa di tipo IIB, si trova che i valori *gIIB* e *1/gIIB* descrivono la stessa fisica. Se *gIIB* è minore di 1, allora *1/gIIB* è maggiore di 1 e viceversa.

Piú specificamente, l'analisi dettagliata della situazione dà indicazioni convincenti del fatto che, quando la costante di accoppiamento di tipo IIB è maggiore di 1, cambiando questo valore nel suo inverso (che è perciò minore di 1) si ottenga una teoria assolutamente identica a quella di partenza. Analogamente a quel che accade se cerchiamo di contrarre una dimensione circolare al di sotto della lunghezza di Planck, se cerchiamo di aumentare la costante di accoppiamento di tipo IIB fino a un valore maggiore di 1, l'auto-dualità impone che la teoria che cosí otteniamo sia del tutto equivalente alla teoria di stringa di tipo IIB con una costante di accoppiamento minore di 1.

10. Un breve riassunto.

Facciamo il punto della situazione. A metà degli anni ottanta i fisici avevano costruito cinque diverse teorie delle

superstringhe. Analizzate nell'approssimazione dello schema perturbativo, tutte queste teorie appaiono distinte l'una dall'altra. Ma i metodi perturbativi sono validi solo se la costante di accoppiamento di stringa di una data teoria è minore di 1. L'aspettativa, a quell'epoca, era che i fisici sarebbero riusciti a calcolare il valore esatto della costante di accoppiamento per ciascuna delle cinque teorie di stringa; ciò è stato reso tuttavia impossibile dalla forma stessa delle equazioni approssimate che sono state finora ottenute. Per questa ragione i fisici si sono posti l'obiettivo di studiare ciascuna teoria di stringa per tutto un insieme di possibili valori della sua costante di accoppiamento, sia minori di 1 (accoppiamento debole) sia maggiori di 1 (accoppiamento forte). Le proprietà di accoppiamento forte delle cinque teorie di stringa rimangono però inaccessibili ai metodi perturbativi tradizionali.

Recentemente, facendo ricorso alla supersimmetria, i fisici hanno imparato a calcolare alcune proprietà di accoppiamento forte di una data teoria di stringa. E con grande stupore della maggior parte degli specialisti del settore, le proprietà di accoppiamento forte della stringa eterotica-O risultano identiche alle proprietà di accoppiamento debole della stringa di tipo I e viceversa. Si è inoltre scoperto che la fisica della stringa di tipo IIB rimane la stessa sia in regime di accoppiamento forte che di accoppiamento debole. Queste inattese corrispondenze ci incoraggiano a seguire le idee di Witten, concentrando la nostra attenzione sulle altre due teorie di stringa, quella di tipo IIA e quella eterotica-E, per verificare se anch'esse rientrano nello schema complessivo. Ci aspettano altre sorprese, ancora piú bizzarre. Ma è opportuno fare prima una breve digressione storica.

11. La supergravità.

Verso la fine degli anni settanta, prima che montasse l'ondata di interesse per la teoria delle stringhe, molti fisici teorici cercavano una unificazione della meccanica quantistica, della gravità e delle altre interazioni nell'ambito di una teoria quantistica di campo ancora basata sulla nozione di particella puntiforme. La speranza era che le incompatibilità tra teorie particellari della gravità e della meccanica quantistica si potessero superare ammettendo gruppi di simmetria molto grandi. Nel 1976, Daniel Freedman, Sergio Ferrara e Peter Van Nieuwenhuizen (a quell'epoca tutti e tre alla State University of New York a Stony Brook) scoprirono che la soluzione piú promettente, era fondata sulla supersimmetria, dato che bosoni e fermioni mostrano la tendenza a produrre fluttuazioni quantistiche che si cancellano le une con le altre e contribuiscono cosí a moderare la frenetica agitazione ultramicroscopica. I tre fisici coniarono il nome di « supergravità » per designare le teorie quantistiche di campo supersimmetriche volte a incorporare la relatività generale. Anche se tali tentativi di conciliare meccanica quantistica e relatività si rivelarono fallimentari, da quelle ricerche fu possibile trarre un insegnamento prezioso, che anticipava i futuri sviluppi della teoria delle stringhe.

Questo insegnamento - che fu messo in chiara luce dal lavoro di Eugene Cremmer, Bernard Julia e Joél Scherk, tutti dell'Ecole Normale Supérieure -consisteva nel fatto seguente: fra tutte le teorie proposte, quelle che arrivavano piú vicino al loro obiettivo erano le teorie di supergravità formulate in un numero di dimensioni superiore a quattro. In particolare, le piú promettenti erano quelle che richiedevano dieci o undici dimensioni (undici si dimostra essere il massimo numero possibile di dimensioni [11] Nell'ipotesi in cui tutte le dimensioni, tranne le quattro ordinarie, siano arrotolate, si dimostra che una teoria in piú di undici dimensioni dà origine a particelle di massa nulla, il cui spin è maggiore di due. Questa possibilità è però da escludersi per ragioni sia teoriche che sperimentali.). Il contatto con le usuali quattro dimensioni osservate veniva ristabilito, anche in questo caso, attraverso una costruzione *à la* Kaluza-Klein: le dimensioni extra erano arrotolate. Le teorie in dieci dimensioni prevedevano sei dimensioni arrotolate - tante quante nelle teorie di stringa - mentre quelle in undici dimensioni prevedevano sette dimensioni arrotolate.

Quando, nel 1984, l'uragano della teoria delle stringhe si abbatté sulla fisica teorica, un vento di rinnovamento soffiò anche sulle teorie della supergravità. Come abbiamo piú volte sottolineato, una stringa esaminata con la precisione sperimentale raggiungibile attualmente - e anche in futuro, per quel che possiamo prevedere - sembra una particella puntiforme. Per essere piú esatti, dovremmo esprimerci cosí: nella teoria delle stringhe, se ci limitiamo a studiare processi a bassa energia (quei processi, cioè, la cui energia non è sufficiente a «penetrare» nell'ultramicroscopico e a rilevare il carattere esteso della stringa), possiamo approssimare una stringa con una particella puntiforme priva di struttura interna, usando lo schema consueto delle teorie quantistiche di campo. Non possiamo invece servirci di questa approssimazione nel caso di processi ad alta energia (ovvero quando le distanze sono dell'ordine della lunghezza di Planck): sappiamo infatti che per risolvere quelle incompatibilità tra meccanica quantistica e relatività generale, che le teorie particellari non riescono a sanare, è essenziale disporre di oggetti estesi quali le stringhe. Ma a basse energie (se le distanze sono

abbastanza grandi) non ci si imbatte in questo genere di problemi ed è dunque possibile, per rendere piú facili i calcoli, servirsi dell'approssimazione particellare.

La teoria quantistica di campo che meglio approssima la teoria delle stringhe, nel senso appena spiegato, risulta essere proprio la supergravità in dieci dimensioni. Le particolari proprietà della supergravità in dieci dimensioni scoperte negli anni settanta e ottanta vengono ora interpretate come vestigia delle proprietà della teoria delle stringhe. Studiando quella teoria della supergravità, i ricercatori avevano scoperto soltanto la punta di un iceberg gigantesco - l'articolata e potente teoria delle superstringhe. Si dimostra in effetti che esistono quattro diverse teorie della supergravità in dieci dimensioni, che differiscono l'una dall'altra per alcuni dettagli riguardanti il modo in cui la supersimmetria viene implementata nella teoria. Tre di queste teorie rappresentano le approssimazioni a basse energie delle teorie di stringa di tipo IIA, di tipo IIB ed eterotica-E. La quarta costituisce invece l'approssimazione a basse energie sia della teoria di stringa di tipo I sia di quella eterotica-O: con il senno di poi, possiamo dire che fu questo il primo indizio della corrispondenza che lega le due teorie di stringa.

Questa sembrerebbe una storia davvero esemplare, se non fosse per la sorte della supergravità in undici dimensioni, negletta e abbandonata. La teoria delle stringhe, essendo formulata in dieci dimensioni, pare non lasciare alcuno spazio a una teoria in undici dimensioni. Per parecchi anni, l'opinione condivisa dalla maggior parte dei fisici teorici ma non da tutti - fu che la supergravità in undici dimensioni fosse soltanto una curiosità matematica, senza alcuna connessione con la fisica delle stringhe.[12] Una notevole eccezione a questa tendenza generale è costituita dall'importante lavoro, risalente al 1987, di Duff, Paul Howe, Takeo Inami e Kelley Stelle, che si basarono su precedenti risultati di Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin e Townsend per sostenere l'esistenza di una interpretazione in undici dimensioni della teoria delle stringhe in dieci dimensioni.

12. Barlumi della M-teoria.

Quell'opinione è ora cambiata. Al congresso del 1995, Witten argomentò che, partendo con una stringa di tipo IIA e aumentando la sua costante di accoppiamento da un valore molto minore di 1 fino a un valore molto maggiore di 1, la fisica che è ancora possibile analizzare (sostanzialmente quella delle configurazioni BPS saturate) ha un'approssimazione a basse energie che è la supergravità in undici dimensioni.

Quando Witten annunciò questa scoperta, i presenti restarono stupefatti. Si trattava di uno sviluppo per quasi tutti completamente inaspettato. La vostra prima reazione di fronte a questo risultato non è probabilmente dissimile da quella della maggior parte degli specialisti del settore: com'è possibile che una teoria con caratteristiche specifiche di undici dimensioni abbia una qualche attinenza con una teoria in dieci dimensioni?

Per riuscire a capire la risposta a questo interrogativo, che chiarirà alcuni punti significativi, dobbiamo descrivere con maggiore precisione i risultati di Witten. E' tuttavia piú semplice iniziare illustrando un risultato successivo anche se strettamente collegato, ottenuto dallo stesso Witten e da Petr Horava - un borsista della Princeton University che concerne la stringa eterotica-E. La loro scoperta è che anche la teoria di stringa eterotica-E fortemente accoppiata ha una descrizione in undici dimensioni, come illustra la figura 12.7. Nel disegno piú a sinistra della figura 12.7 è rappresentata la stringa eterotica-E con una costante di accoppiamento molto minore di 1. Questo è il contesto che abbiamo descritto nei capitoli precedenti e che i fisici stanno studiando da oltre dieci anni. A mano a mano che ci spostiamo verso destra nella figura 12.7, facciamo aumentare sempre di piú il valore della costante di accoppiamento. Prima del 1995 i fisici sapevano bene che, in conseguenza di ciò, i processi a piú loop (vedi figura 12.6) danno contributi sempre piú rilevanti, finendo per annullare del tutto la validità dello schema perturbativo. Ma nessuno sospettava che all'aumentare della costante di accoppiamento diventasse visibile una nuova dimensione! Questa è la dimensione « verticale » nella figura 12.7. Occorre tenere presente che il reticolo bidimensionale raffigurato nel disegnò piú a sinistra rappresenta tutte le nove dimensioni spaziali in cui vive la stringa eterotica-E, sicché la nuova dimensione «verticale » costituisce una decima dimensione. In tal modo, considerando anche il tempo, il numero totale di dimensioni dello spaziotempo diviene uguale a undici.

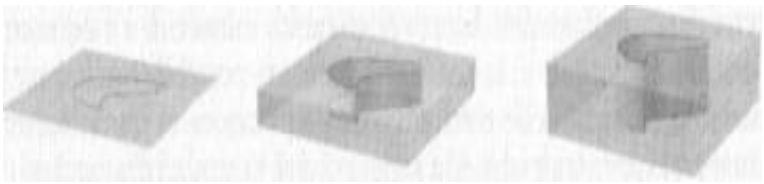

Figura 12.7.
Con l'aumentare della costante di accoppiamento della stringa eterotica-E, diventa visibile una nuova dimensione; la stringa si dilata in una membrana cilindrica.

La figura 12.7 illustra un'altra importante conseguenza dell'esistenza di questa nuova dimensione. Al formarsi della nuova dimensione si modifica la struttura stessa della stringa eterotica-E. Il laccio iniziale, che ha una sola dimensione, si trasforma in un nastro bidimensionale e poi in un cilindro deformato, via via che aumentiamo il valore della costante di accoppiamento. In altre parole, la stringa eterotica-E è effettivamente una membrana bidimensionale, la cui larghezza (cioè l'estensione verticale, nella figura 12.7) è controllata dal valore della costante di accoppiamento. Per oltre un decennio i fisici hanno sempre usato metodi perturbativi fondati sull'ipotesi che la costante di accoppiamento sia molto piccola. Da questa supposizione, secondo il ragionamento di Witten, consegue che gli elementi di base della teoria appaiano e si comportino come lacci provvisti di una sola dimensione - cioè stringhe mentre essi possiedono di fatto anche una seconda dimensione spaziale, che rimane nascosta. Indebolendo l'ipotesi che la costante di accoppiamento debba essere molto piccola e studiando la fisica della stringa eterotica-E anche quando il valore di tale costante è molto maggiore di 1, ecco che questa seconda dimensione spaziale diviene manifesta.

Questo fatto, pur non invalidando alcuna delle conclusioni cui siamo giunti nei capitoli precedenti, ci obbliga a reinterpretarle in un nuovo schema concettuale. Ad esempio, come si accorda tutto ciò con il vincolo delle nove dimensioni spaziali e una temporale richieste dalla teoria delle stringhe? Nel capitolo VIII, come forse ricorderete, abbiamo mostrato che questa condizione si deduce imponendo che il numero di direzioni indipendenti in cui la stringa può vibrare assicuri valori sensati (cioè non negativi) delle probabilità quantistiche. La nuova dimensione, di cui abbiamo appena scoperto l'esistenza, non è associata a una direzione in cui la stringa eterotica-E possa vibrare; si tratta invece di una dimensione imprigionata nella struttura stessa delle «stringhe ». Detto in altri termini, lo schema perturbativo che i fisici hanno usato per dedurre la necessità di uno spaziotempo a dieci dimensioni presuppone fin dal principio che la costante di accoppiamento eterotica-E sia molto piccola. Questa ipotesi - anche se ciò divenne chiaro soltanto molto piú tardi - costituisce il fondamento di due approssimazioni diverse, ma coerenti e compatibili l'una con l'altra: il fatto che la membrana nella figura 12.7 abbia una larghezza cosí piccola da sembrare una stringa e il fatto che l'undicesima dimensione sia cosí piccola da non essere percepibile usando le equazioni perturbative. Accettando questo schema approssimato, siamo indotti a immaginare un universo a dieci dimensioni in cui vibrano stringhe a una sola dimensione. Ma, come ora sappiamo, questa non è altro che l'approssimazione di un universo a undici dimensioni che contiene membrane a due dimensioni.

Per ragioni tecniche, Witten arrivò a scoprire l'undicesima dimensione nel corso delle sue ricerche sulle proprietà di accoppiamento forte della stringa di tipo IIA, ma la storia rimane piú o meno la stessa. Come nell'esempio della stringa eterotica-E, anche in questo caso l'undicesima dimensione è controllata dalla costante di accoppiamento della stringa di tipo IIA. All'aumentare del valore di questa costante, la nuova dimensione si rende manifesta. Quando ciò accade, sostiene Witten, la stringa di tipo IIA, invece di deformarsi in un nastro come nel caso della stringa eterotica-E, si espande in una specie di camera d'aria, come mostra la figura 12.8. Una volta di piú, sebbene i fisici abbiano sempre considerato le stringhe di tipo IIA come oggetti unidimensionali, provvisti di lunghezza ma privi di larghezza, questa idea è solo una diretta conseguenza dell'applicazione dello schema perturbativo, in cui si presuppone che la costante di accoppiamento sia molto minore di 1. Se la natura richiede che il valore di questa costante di accoppiamento debba essere piccolo, questa risulta senz'altro un'ottima e ammissibile approssimazione. Ciò nonostante, come dimostrano in modo convincente le argomentazioni addotte da Witten e da molti altri fisici nel corso della seconda rivoluzione delle superstringhe, le «stringhe » di tipo IIA ed eterotiche-E sono, fondamentalmente, membrane bidimensionali che vivono in un universo a undici dimensioni.

Ma che cos'è questa teoria in undici dimensioni? A basse energie (basse in confronto all'energia di Planck) - sostengono Witten e altri è approssimata dalla teoria quantistica di campo, a lungo trascurata, della supergravità in undici dimensioni. Ma qual è la descrizione della teoria ad alte energie? La questione è al centro di un'intensa attività di ricerca. Già sappiamo

dalle figure 12.7 e 12.8 che questa teoria in undici dimensioni contiene oggetti estesi a due dimensioni, vale a dire membrane bidimensionali. E come vedremo tra poco, svolgono un ruolo importante anche oggetti aventi dimensione superiore. Ma al di là di una congerie di proprietà disparate, nessuno sa veramente che cosa sia questa teoria in undici dimensioni. Le membrane sono i suoi ingredienti fondamentali? Quali sono le proprietà che la definiscono? In che modo dovrebbe essere in relazione con la fisica che conosciamo? Se le costanti di accoppiamento sono piccole, le risposte migliori di cui oggi disponiamo a questi interrogativi sono descritte nei capitoli precedenti, e sono date dalle teorie di stringa. Ma se le costanti di accoppiamento non sono piccole, nessuno oggi conosce le risposte giuste.

Figura 12.8.
Con l'aumentare della costante di accoppiamento della stringa IIA, le stringhe si trasformano in oggetti bidimensionali che assomigliano alla camera d'aria di una bicicletta.

Qualunque cosa sia questa teoria in undici dimensioni, Witten l'ha provvisoriamente battezzata *M-teoria.* Questo nome può significare molte cose diverse; tante teste tante idee. Alcuni esempi: teoria del Mistero, teoria Madre (nel senso di Madre di tutte le teorie), teoria delle Membrane, teoria delle Matrici (secondo i recenti risultati di Tom Banks della Rutgers University, Willy Fischer della University of Texas a Austin, Stephen Shenker della Rutgers University, e secondo Susskind che propone una nuova interpretazione della teoria). Ma anche senza comprendere appieno il suo nome o le sue proprietà, è già chiaro che la M-teoria fornisce un substrato unificante capace di conciliare tutte e cinque le teorie di stringa.

13. La M-teoria e la rete di interrelazioni.

C'è un vecchio apologo a proposito di tre ciechi e un elefante. Il primo cieco afferra le zanne dell'elefante e descrive la liscia e dura superficie che percepisce al tatto. Il secondo cieco afferra una zampa dell'elefante e descrive il tronco coriaceo e muscoloso che percepisce al tatto. Il terzo cieco afferra la coda dell'elefante e descrive la sottile e nervosa appendice che percepisce al tatto. Dato che le tre descrizioni sono diverse, e nessuno può vedere gli altri due, ciascun cieco è convinto di aver afferrato un animale diverso. Per molti anni i fisici hanno brancolato nel buio come ciechi, credendo che le cinque teorie di stringa fossero davvero molto diverse l'una dall'altra. La seconda rivoluzione delle superstringhe li ha ora convinti che la M-teoria è il pachiderma che unifica queste cinque teorie.

In questo capitolo abbiamo descritto in che modo si modifica la nostra comprensione della teoria delle stringhe se ci spingiamo oltre i limiti di applicabilità dello schema perturbativo, l'approccio implicitamente usato in tutti i capitoli precedenti. La figura 12. 9 riassume le interrelazioni che abbiamo trovato fino a questo punto (le frecce indicano le teorie duali). Come si può vedere, abbiamo cosí una rete di connessioni, ma è ancora incompleta. Il lavoro può essere portato a termine includendo anche le dualità di cui abbiamo parlato nel capitolo X.

Consideriamo nuovamente la dualità che scambia una dimensione circolare di raggio R con una di raggio 1/R. Nel capitolo X abbiamo sorvolato su un aspetto di questa dualità, che ora dobbiamo chiarire. Abbiamo infatti analizzato le proprietà delle stringhe in un universo con una dimensione circolare senza specificare con quale delle cinque formulazioni della teoria delle stringhe stessimo lavorando. Il ragionamento svolto in quel capitolo mostrava che, scambiando modi di avvolgimento e modi di vibrazione, la fisica delle stringhe di un universo con una dimensione circolare di raggio 1/R si può riformulare esattamente in termini di un universo con una dimensione circolare di raggio R. Il punto sui cui abbiamo sorvolato è che questa dualità, in realtà, scambia la teoria di stringa di tipo IIA con quella di tipo IIB e la teoria di stringa eterotica-O con quella eterotica-E. In altre parole, l'enunciazione precisa della dualità raggio R-raggio 1/R è la seguente: la fisica della stringa di tipo IIA in un universo la cui dimensione circolare abbia raggio R è identica alla fisica della stringa di tipo IIB in un universo la cui dimensione circolare abbia raggio 1/R (un enunciato analogo vale per la stringa eterotica-E e quella eterotica-O). Questo perfezionamento della dualità raggio R-raggio 1/R, che non modifica la sostanza delle conclusioni del capitolo X, è di estrema importanza per il nostro ragionamento.

Stabilendo un legame tra le teorie di stringa di tipo IIA e IIB e tra le teorie di stringa eterotíca-0 ed eterotica-E,

infatti, la dualità raggio R-raggio 1/R completa la rete di interrelazioni tra le varie teorie di stringa, cosí come mostrano le frecce tratteggiate nella figura 12.10. Tutte e cinque le teorie di stringa, insieme con la M-teoria, risultano cosí duali l'una all'altra, interconnesse da un unico schema teorico: altro non sono che cinque maniere diverse di descrivere la medesima fisica. Certo, a seconda delle varie applicazioni, una formulazione può rivelarsi molto piú efficace di un'altra; ad esempio, è molto piú facile lavorare con la teoria di stringa eterotica-O debolmente accoppiata piuttosto che con la teoria di stringa di tipo 1 fortemente accoppiata. Ma la fisica che descrivono è esattamente la stessa.

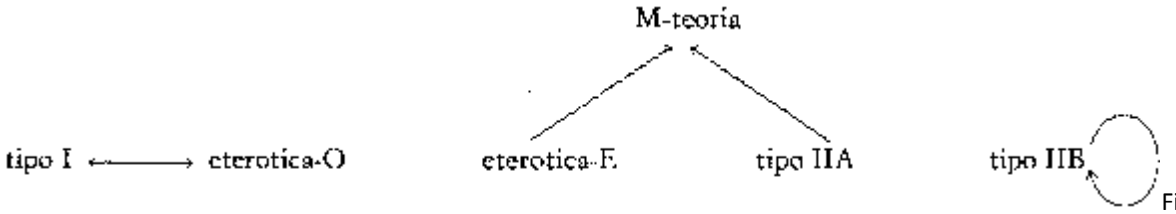

Figura 12. 9.

Le frecce indicano le teorie duali l'una dell'altra.

14. Il quadro complessivo.

Siamo ora in grado di comprendere piú a fondo le due figure 12. 1 e 12.2, di cui ci siamo serviti all'inizio di questo capitolo per riassumere i punti essenziali della seconda rivoluzione delle superstringhe. Come si vede nella figura 12. 1, prima del 1995 avevamo cinque teorie di stringa del tutto distinte. Numerosi fisici teorici lavoravano sulle singole teorie, convinti che fossero tutte differenti, poiché non avevano ancora capito il ruolo delle dualità. Ciascuna di queste cinque teorie di stringa possedeva alcune caratteristiche variabili, come il valore della costante di accoppiamento o la forma geometrica e l'estensione delle dimensioni compattificate. La speranza era (ed è ancora oggi) che queste proprietà sarebbero state determinate dalla teoria stessa, ma i fisici, non essendo in grado di determinarle mediante le equazioni approssimate a loro disposizione, si sono limitati a studiare la fisica derivante da una serie di scelte possibili. Questo è quanto rappresentano le regioni annerite della figura 12. 1: ogni punto di tali regioni denota una scelta specifica del valore della costante di accoppiamento e della struttura geometrica delle dimensioni compattificate. Se non si fa ricorso alle dualità, abbiamo soltanto cinque diverse (famiglie di) teorie.

Ma se applichiamo tutte le dualità che abbiamo descritto, allora, variando i parametri geometrici e la costante di accoppiamento, riusciamo a passare da una teoria all'altra, a condizione di includere la regione centrale - di unificazione - costituita dalla M-teoria: arriviamo cosí alla figura 12.2. Sebbene la nostra comprensione della M-teoria rimanga ancora molto limitata, queste argomentazioni indirette danno un solido fondamento all'ipotesi che essa sia effettivamente il substrato unificante delle cinque teorie di stringhe, che ingenuamente credevamo distinte. Abbiamo inoltre imparato che la M-teoria è strettamente legata a una sesta teoria - la supergravità in undici dimensioni - e questo nesso ulteriore è rappresentato nella figura 12.11, una versione piú precisa della figura 12.2 .[13] Piú precisamente, dovremmo interpretare la figura *12.11* come la rappresentazione di una teoria che dipende da vari parametri. Tali parametri comprendono non solo le costanti di accoppiamento, ma anche i parametri che determinano la geometria dello spaziotempo. In linea dì principio, dovrebbe essere possibile usare la teoria per calcolare dei valori specifici di tutti questi parametri - cioè, uno specifico valore della costante di accoppiamento e una specifica geometria dello spaziotempo - ma allo stato attuale delle conoscenze questo obiettivo non è ancora realizzabile. Di conseguenza, i fisici cercano di comprendere meglio la teoria studiando le sue proprietà al variare dei parametri. Se scegliamo i valori dei parametri in una delle sei regioni peninsulari della figura *12.11,* la teoria avrà le proprietà che caratterizzano una delle cinque teorie di stringa o la supergravità in undici dimensioni, a seconda dei casi. Se i valori dei parametri appartengono invece alla regione centrale, la fisica è governata dall'ancora misteriosa M-teoria.

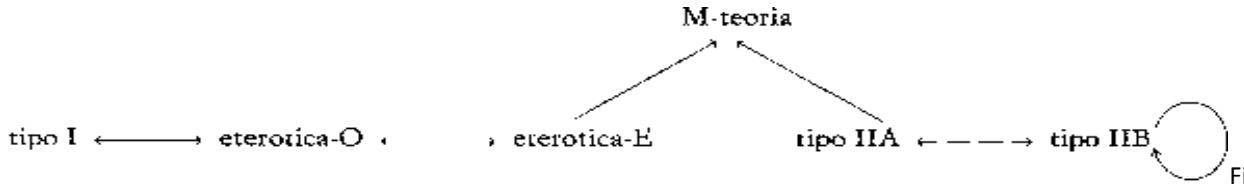

Figura 12.10.

Considerando anche le dualità che riguardano la geometria dello spaziotempo (descritte nel capitolo x), tutte e cinque le teorie di stringa e la M-teoria sono collegate da una rete di dualità.

La figura 12.11 vuole evidenziare che le idee e le equazioni fondamentali della M-teoria - sebbene comprese solo parzialmente - riescono a unificare quelle di tutte le formulazioni della teoria delle stringhe. La M-teoria è l'elefante teorico che ha aperto gli occhi dei fisici, rivelando loro uno schema di unificazione ancora piú grandioso.

15. Una sorprendente proprietà della M-teoria: la democrazia delle dimensioni.

Quando, in ciascuna delle cinque penisole superiori del «territorio» mappato nella figura 12.11, la costante di accoppiamento è piccola, l'ingrediente fondamentale della teoria appare come una stringa unidimensionale. Abbiamo però imparato a considerare questo fatto da un nuovo punto di vista. Se partiamo dalla penisola eterotica-E o di tipo IIA e incrementiamo il valore delle rispettive costanti di accoppiamento, ecco che ci spostiamo verso l'interno del territorio della M-teoria, e gli oggetti che sembravano stringhe unidimensionali si trasformano in membrane bidimensionali. Ma c'è di piú: attraverso una successione piú o meno complicata di relazioni di dualità che coinvolgono tanto le costanti di accoppiamento di stringa quanto la geometria delle dimensioni spaziali arrotolate, è possibile passare in maniera continua e «liscia» da un punto qualunque all'altro della figura 12.11. Dato che possiamo seguire le membrane bidimensionali - che abbiamo trovato partendo dalle stringhe eterotiche-E e di tipo IIA - mentre ci spostiamo verso le regioni delle altre tre teorie di stringa, scopriamo che in tutte e cinque le formulazioni della teoria delle stringhe devono essere presenti anche membrane bidimensionali.

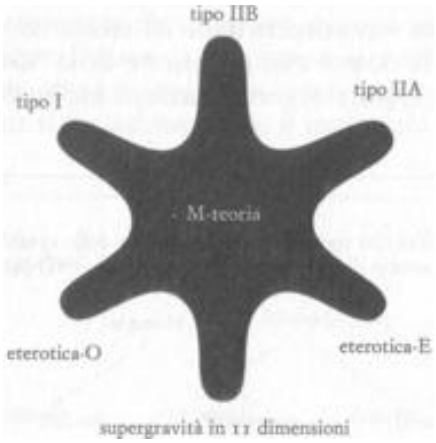

Figura 12.11.
Tenendo conto delle dualità, le cinque teorie di stringa, la supergravità in undici dimensioni e la M-teoria rientrano in uno schema unificato.

Sorgono due interrogativi. Primo: le membrane bidimensionali sono i veri ingredienti fondamentali della teoria delle stringhe? Secondo: tenuto conto che tra la fine degli anni settanta e l'inizio degli anni ottanta si è avuta l'audacia di passare dalle particelle puntiformi zero-dimensionali alle stringhe dimensionali e che ora si è scoperto che nella teoria delle stringhe entrano in gioco anche membrane bidimensionali, non potrebbe essere che la teoria preveda anche oggetti di dimensione superiore? Ora come ora -mentre scriviamo queste righe - non si è ancora in grado di rispondere in modo esaustivo a queste domande, ma la situazione sembra essere la seguente.

Per analizzare la struttura di ciascuna delle cinque teorie di stringa al di là del dominio di validità dei metodi perturbativi abbiamo fatto assegnamento sulla supersimmetria. In particolare, le proprietà degli stati BPS, le loro masse e le loro cariche di gauge, sono determinate in maniera univoca dalla supersimmetria, ed è proprio questo che ci permette di comprendere alcune caratteristiche delle teorie di stringa fortemente accoppiate senza essere costretti a eseguire calcoli

di inimmaginabile difficoltà. A dire il vero, grazie al lavoro iniziale di Horowitz e Strominger e, successivamente, ai risultati innovativi di Polchinski, di questi stati BPS sappiamo qualcosa di piú preciso: non soltanto ci sono note le loro masse e le loro cariche, ma conosciamo anche la loro forma geometrica. Il quadro che ne risulta è davvero sorprendente. Alcuni stati BPS sono stringhe unidimensionali, altri membrane bidimensionali. E fin qui niente di nuovo: sono forme che ci sono già familiari. Ma - sorpresa - vi sono anche stati BPS che sono tridimensionali e altri ancora che sono quadridimensionali: in effetti, le possibilità sono tante quante il numero delle dimensioni spaziali, fino a nove compreso. Insomma, la teoria delle stringhe - o forse dovremmo dire M-teoria, o chissà come diavolo si chiamerà in futuro -prevede l'esistenza di oggetti estesi con un numero qualsiasi di dimensioni spaziali. I fisici hanno coniato il termine «tre-brana» per designare gli oggetti estesi aventi tre dimensioni spaziali, « quattro-brana » per quelli aventi quattro dimensioni spaziali e cosí di seguito, fino ad arrivare alle «nove-brane» (in generale, per indicare uno stato *BPS* avente p dimensioni spaziali, essendo p un numero intero, i fisici si servono del termine non molto eufonico di «phrana»). A volte, usando questa terminologia, le stringhe sono chiamate « uno-brane » e le membrane « due-brane ». Facendo riferimento alla presenza di tutti questi oggetti estesi nella teoria, Paul Townsend ha potuto proclamare una «democrazia delle brane».

Malgrado questa democrazia delle brane, le stringhe - gli oggetti estesi unidimensionali - mantengono comunque un ruolo speciale, per la seguente ragione. I fisici hanno mostrato che la massa degli oggetti estesi di qualsiasi dimensione, con la sola eccezione delle stringhe, è inversamente proporzionale al valore della corrispondente costante di accoppiamento quando ci troviamo in una delle cinque «penisole delle stringhe » che si vedono nella figura *12.11.* Ciò significa che nel caso di teorie debolmente accoppiate tutti gli oggetti estesi tranne le stringhe sono enormemente massivi: parecchi ordini di grandezza piú pesanti della massa di Planck. Poiché sono cosí pesanti, le brane, per essere prodotte, richiedono (a causa di E = *MC2) energie* spaventosamente elevate e pertanto hanno un effetto trascurabile su buona parte della fisica (ma non su tutta, come vedremo nel prossimo capitolo). Se però ci allontaniamo dalle regioni peninsulari della figura *12.11,* le brane multidimensionali diventano piú leggere e dunque anche piú importanti.[14] Si dovrebbe osservare, tuttavia, che anche all'interno delle regioni peninsulari le brane potrebbero esercitare qualche effetto esotico sulla fisica che ci è familiare. E' stata avanzata l'ipotesi, ad esempio, che le stesse tre dimensioni spaziali macroscopiche potrebbero essere una tre-brana, molto grande e non curva. Se cosí fosse, sbrigando le nostre faccende quotidiane non faremmo altro che andarcene a spasso all'interno di una membrana tridimensionale.

Il quadro che si è delineato è piú o meno il seguente. Nella regione centrale della figura *12. 11,* abbiamo una teoria i cui ingredienti fondamentali non sono soltanto stringhe, ma brane di ogni possibile dimensione, e tutte si trovano sostanzialmente su un piede di parità. Ancora ci sfuggono molti aspetti essenziali di questa teoria, tuttavia almeno una cosa è chiara: se ci spostiamo dalla regione centrale verso una qualsiasi delle cinque penisole della figura *12.11,* solamente le stringhe (o membrane cosí « arrotolate » da sembrare in tutto e per tutto stringhe, come nelle figure *12.7* e *12.8)* sono sufficientemente leggere da rimanere in contatto con la fisica che ci è nota: le particelle elementari della tabella 1.1 e le quattro forze fondamentali che mediano le loro interazioni. Le analisi perturbative condotte dai fisici per quasi due decenni non raggiunsero un grado di precisione sufficiente a rivelare l'esistenza delle brane super-massive dì dimensione superiore: le stringhe erano le incontrastate protagoniste e la teoria, di conseguenza, fu battezzata con il nome ben poco democratico di «teoria delle stringhe». Ma in queste regioni della figura *12.11 - lo* ripetiamo ancora una volta - è del tutto legittimo, in quasi tutte le circostanze, limitarsi a considerare soltanto le stringhe, cosí come abbiamo fatto nelle pagine precedenti. Ora però sappiamo che la teoria è in realtà molto piú ricca di quanto nessuno potesse nemmeno sospettare.

16. I problemi aperti della teoria delle stringhe trovano finalmente risposta ?

Sí e no. Siamo riusciti a rendere piú profonda la nostra conoscenza della teoria delle stringhe, facendo piazza pulita di alcune conclusioni errate, che derivavano soltanto dalle approssimazioni delle analisi perturbative e non rispecchiavano la vera fisica delle stringhe. Ma la portata attuale dei metodi non perturbativi è ancora troppo limitata. Sebbene molti aspetti della teoria delle stringhe risultino ora piú chiari grazie alla mirabile rete di relazioni di dualità che abbiamo scoperto, rimangono molte questioni insolute. Ad esempio, nessuno ha idea di come si possano migliorare le equazioni approssimate che dovrebbero fornire il valore della costante di accoppiamento di stringa - equazioni, come abbiamo visto, dalle quali è impossibile ricavare alcuna informazione utile. Né abbiamo fatto passi in avanti significativi nel capire perché esistano esattamente tre dimensioni spaziali macroscopiche, o nel determinare la precisa forma geometrica delle dimensioni compattificate. Per risolvere questi problemi avremmo bisogno di metodi non perturbativi piú efficaci di quelli di cui attualmente disponiamo.

Quel che abbiamo finora raggiunto è una comprensione piú profonda della struttura logica e delle potenzialità concettuali della teoria delle stringhe. Prima delle scoperte sintetizzate nella figura *12.11,* il regime di accoppiamento forte di ciascuna delle cinque teorie di stringa era un mistero assoluto, una scatola nera. Come nelle antiche carte geografiche, le plaghe dell'accoppiamento forte erano terra incognita, potenzialmente infestate da draghi e mostri marini. Ora sappiamo invece che il viaggio verso questi territori, sebbene ci faccia attraversare delle regioni ancora inesplorate della M-teoria, finisce per ricondurci nei paraggi tranquillizzanti dell'accoppiamento debole, quantunque nel linguaggio duale di quella che una volta si credeva essere una teoria di stringa completamente diversa.

La dualità e la M-teoria uniscono tra loro le cinque teorie delle stringhe e suggeriscono un'idea importante. Può darsi che le sorprese siano finite e che non ci rimangano da fare altre scoperte di importanza paragonabile a quelle che abbiamo descritto in questo capitolo. Quando il cartografo arriva a riempire ogni possibile regione del planisfero, ecco che la mappa è terminata e la conoscenza geografica è completa. Il che non significa negare i meriti scientifici o culturali di altri eventuali viaggi di esplorazione in Antartide o in qualche sperduto atollo della Micronesia; vuol dire semplicemente che l'epoca delle scoperte geografiche è conclusa, non rimangono «hic sunt leones» sul mappamondo La «mappa teorica» schematizzata nella figura 12.11 ha un significato analogo per i fisici teorici. Esaurisce tutta la gamma di teorie che si possono raggiungere partendo da una qualsiasi della cinque formulazioni della teoria delle stringhe. Benché si conosca ancora molto poco della terra incognita della M-teoria, sulla mappa non compaiono lacune da colmare. Come il cartografo, anche il teorico delle stringhe può affermare con cauto ottimismo, che l'intero spettro delle teorie logicamente consistenti che comprendono le scoperte cruciali del secolo passato - relatività ristretta e generale, meccanica quantistica, teorie di gauge della forza elettromagnetica, debole e forte, supersimmetria, formulazione di Kaluza e Klein - è rappresentato nella «mappa teorica» della figura 12.11.

La sfida che ora si prospetta ai teorici delle stringhe - o forse dovremmo dire agli M-teorici - sta nel riuscire a mostrare che un *qualche* punto della figura 12. 11 descrive effettivamente il nostro universo. Per realizzare questo obiettivo dovremo determinare le equazioni esatte e complete, la cui soluzione individuerà, sulla nostra mappa, questo punto cosí elusivo, e capire poi la fisica corrispondente in modo sufficientemente preciso da rendere possibile il confronto con i dati sperimentali. Come ha osservato Witten, «capire che cosa sia realmente la M-teoria - quale fisica nasconda - modificherebbe la nostra comprensione della natura in maniera non meno radicale di quanto non abbiano fatto le grandi rivoluzioni scientifiche del passato.» [15] Conversazione con Edward Witten, 11 maggio 1998.
Questo è il programma per la grande unificazione del ventunesimo secolo.

Capitolo tredicesimo
Buchi neri: una nuova prospettiva

L'incompatibilità tra relatività generale e meccanica quantistica prima dell'avvento della teoria delle stringhe rappresentava un vero e proprio affronto al nostro credo viscerale che le leggi della natura debbano armonizzarsi in un unico schema coerente. Ma questo contrasto non costituiva soltanto un problema astratto, per quanto di cruciale rilevanza teorica. Non possiamo sperare di comprendere le condizioni fisiche estreme che sussistevano al momento del big bang o quelle che si producono in un buco nero senza un'adeguata formulazione quantistica della forza gravitazionale. Con la scoperta della teoria delle stringhe abbiamo forse qualche chance di risolvere questi misteri. In questo e nel prossimo capitolo descriveremo quali progressi abbiano compiuto i fisici teorici nella comprensione dei buchi neri e dell'origine dell'universo.

1. Buchi neri e particelle elementari.

Di primo acchito è difficile immaginare cose piú diverse tra loro come i buchi neri e le particelle elementari. In genere ci raffiguriamo i buchi neri come corpi celesti di una pantagruelica voracità, mentre le particelle sono i piú microscopici minuzzoli di materia. Ma le ricerche svolte sul finire degli anni sessanta e all'inizio degli anni settanta da numerosi fisici teorici, quali Demetrios Christodoulou, Werner Israel, Richard Price, Brandon Carter, Roy Kerr, David Robinson, Hawking e Penrose, hanno mostrato che buchi neri e particelle elementari non sono in fin dei conti cosí diversi come si potrebbe pensare. Da tali ricerche sono emerse prove sempre piú convincenti a sostegno di quell'assunto sintetizzato da John Wheeler nella colorita espressione: «I buchi neri non hanno capelli». Con questa locuzione Wheeler intende dire che, all'infuori di un numero molto ristretto di caratteristiche distintive, tutti i buchi si assomigliano. Quali caratteristiche distintive? Una, naturalmente, è la massa del buco nero. E le altre? Si è mostrato che sono la carica elettrica del buco nero, certe altre cariche di gauge di cui può essere dotato e, infine, la velocità con cui gira su se stesso (il suo spin). E non c'è altro. Due buchi neri che abbiano la stessa massa, le stesse cariche e lo stesso spin sono identici. Non ci sono «acconciature» stravaganti -cioè, altre proprietà intrinseche - che possano distinguere un buco nero dall'altro. Questo dovrebbe far squillare un campanello d'allarme. Come ricorderete, massa, cariche di gauge e spin sono proprio le caratteristiche che distinguono l'una dall'altra le particelle elementari. Questo parallelismo ha indotto numerosi fisici, nel corso degli ultimi decenni, a formulare la strana ipotesi che i buchi neri potrebbero in realtà essere gigantesche particelle elementari.

Secondo la teoria di Einstein, in effetti, non c'è una massa minima per un buco nero. Se comprimiamo un pezzo di materia di qualsiasi massa fino a ridurlo a dimensioni sufficientemente piccole, le leggi della relatività generale ci dicono che diventerà un buco nero (ma quanto piú leggera è la massa del corpo, tanto piú piccole saranno le dimensioni a cui dovremo schiacciarlo). Possiamo perciò immaginare di fare il seguente esperimento mentale: prendiamo corpi di massa via via minore, li comprimiamo fino a farli divenire buchi neri via via piú piccoli e confrontiamo le proprietà di questi buchi neri con le proprietà delle particelle elementari. Dal fatto che, come dice Wheeler, «i buchi neri non hanno capelli» possiamo dedurre che, partendo da masse sufficientemente leggere, otterremo buchi neri che assomiglieranno molto alle particelle elementari. Sia queste che quelli, infatti, appaiono come pacchetti di materia completamente caratterizzati dalle loro masse, cariche di gauge e spin.

Ma c'è una difficoltà. I buchi neri degli astrofisici hanno una massa pari a molte volte quella del Sole, e pertanto

sono cosí grandi e pesanti che per studiare le loro proprietà sono sufficienti solo le equazioni della relatività generale, mentre la meccanica quantistica gioca un ruolo del tutto marginale. (Stiamo parlando della struttura complessiva del buco nero, non del punto singolare centrale in cui avviene il collasso gravitazionale; per la descrizione delle proprietà di questa regione, a causa delle sue ridottissime dimensioni, si deve certamente far ricorso alla meccanica quantistica). Se cerchiamo di creare buchi neri sempre meno massivi, arriveremo tuttavia al punto in cui non potremo piú trascurare gli effetti quantistici. Ciò accade quando la massa totale del buco nero è dell'ordine della massa di Planck o piú piccola. (Dal punto di vista della fisica delle particelle elementari, la massa di Planck è molto grande - circa dieci miliardi di miliardi di volte la massa del protone; per i buchi neri, invece, la massa di Planck è piccola, essendo circa uguale a quella di un granello di polvere). In tal modo, i fisici che investigavano l'ipotetica relazione tra buchi neri e particelle elementari, vennero a scontrarsi con l'incompatibilità tra relatività generale - il nocciolo della teoria dei buchi neri - e meccanica quantistica. Negli anni passati, questa incompatibilità paralizzò ogni progresso in questa affascinante direzione.

2. La teoria delle stringhe ci permette di fare qualche passo avanti?

Sí. Attraverso un'analisi raffinata - e per molti versi sorprendente delle proprietà dei buchi neri, la teoria delle stringhe riesce a stabilire per la prima volta una connessione ineccepibile dal punto di vista teorico tra buchi neri e particelle elementari. La strada che conduce a questo risultato è un po' tortuosa, ma vale la pena di intraprendere il viaggio, perché avremo cosí modo di passare in rassegna alcuni tra i piú interessanti sviluppi della teoria delle stringhe.

All'origine di tutto sta un problema in apparenza privo di alcuna relazione con i buchi neri, nel quale i teorici delle stringhe si sono imbattuti verso la fine degli anni ottanta. Matematici e i fisici sanno che, quando sei dimensioni spaziali sono compattificate in uno spazio di Calabi-Yau, esistono almeno due tipi di sfere che possono essere «immerse» *(embedded)* nella struttura geometrica di un tale spazio. Ci sono le sfere bidimensionali, simili alla superficie di una palla, che svolgevano un ruolo cruciale nelle transizioni attraverso flop descritte nel capitolo XI. Le sfere dell'altro tipo, sebbene molto piú difficili da immaginare, non sono meno frequenti: si tratta di sfere *tridimensionali,* simili alla superficie di palle che rimbalzino capricciose in un mondo provvisto di *quat*tro dimensioni spaziali. Naturalmente, come abbiamo già osservato nel capitolo XI, una normale palla del nostro universo è un oggetto tridimensionale, ma la sua superficie - come la superficie di un tubo di gomma - è bidimensionale: sono infatti necessari due numeri (longitudine e latitudine) per specificare un punto qualsiasi sulla sua superficie. Supponiamo ora di avere una dimensione spaziale in piú: una palla quadridimensionale, la cui superficie sia tridimensionale. Siccome è quasi impossibile formarsi un'immagine mentale di una palla di questo genere, nella maggior parte dei casi cercheremo di aiutarci nel ragionamento pensando ad analoghi oggetti geometrici con una dimensione di meno, che riusciamo a visualizzare facilmente. Ma, come ora vedremo, un aspetto specifico della natura tridimensionale di queste sfere risulta di primaria importanza.

Studiando le equazioni della teoria delle stringhe, i fisici si sono resi conto che è possibile - anzi, probabile - che, al trascorrere del tempo, queste sfere tridimensionali si contraggano, collassino su stesse fino ad assumere un volume infinitesimale. Ma che cosa accadrebbe di preciso qualora una porzione dello spazio dovesse collassare in questa maniera? Si verificherebbe qualche evento catastrofico in conseguenza di una simile «strozzatura» nella trama spaziale? Sono interrogativi molto simili a quelli che già abbiamo affrontato e risolto nel capitolo XI nel caso del collasso di sfere bidimensionali, mentre ora siamo interessati a studiare il collasso di sfere tridimensionali. (Come nel capitolo XI, anche in questo caso stiamo supponendo che si contragga solo una porzione dello spazio di Calabi-Yau, non tutto lo spazio, sicché non possiamo applicare la dualità raggio R-raggio 1/R del capitolo *X*). E il cambiamento di dimensione produce un'essenziale differenza qualitativa.[1] A una sfera tridimensionale che si contrae a un punto in uno dato spazio di CalabiYau corrisponde una sfera bidimensionale che si contrae a un punto nello spazio di Calabi-Yau che è suo partner speculare. Questa riformulazione del problema sembrerebbe riportarci alla situazione dei flop trattati nel capitolo XI, ma cosí non è. In effetti, le proprietà stesse della simmetria speculare impongono che in questo caso il campo tensoriale antisimmetrico Bmv - la parte reale della forma di Káhler complessificata sullo spazio di Calabi-Yau speculare - si debba annullare, e ciò dà luogo a un tipo di. singolarità molto meno trattabile.

Come ricorderete, uno dei punti cruciali del ragionamento svolto nel capitolo I era l'osservazione che le stringhe, nel loro moto attraverso lo spazio, possono «prendere al laccio » una sfera bidimensionale: in parole piú precise, il foglio di universo di una stringa - che è bidimensionale - può circondare completamente una sfera bidimensionale, come mostrato nella figura 11.6. Si dimostra cosí che si viene a creare una specie di barriera protettiva in grado di impedire che il collasso di una sfera bidimensionale, che produce una «strozzatura » nello spaziotempo, abbia effetti catastrofici. Ma

ora, nel nostro spazio di Calabi-Yau, stiamo considerando sfere tridimensionali, che non possono essere circondate dal foglio di universo di una stringa. Se avete qualche difficoltà a visualizzare questa impossibilità, potete aiutarvi pensando all'analoga situazione geometrica che si ottiene abbassando di uno tutte le dimensioni in gioco. Va benissimo infatti immaginare una sfera tridimensionale come una normale sfera bidimensionale - la superficie di una palla - a condizione che le stringhe siano immaginate come oggetti zero-dimensionali, vale a dire come particelle puntiformi. Allora, in analogia con il fatto che una particella zero-dimensionale non può «prendere al laccio» un bel niente -figuriamoci una sfera bidimensionale - possiamo concludere che nemmeno una stringa unidimensionale può «prendere al laccio » una sfera tridimensionale.

Questo ragionamento indusse i fisici teorici a ipotizzare che, qualora si fosse verificato il collasso di una sfera tridimensionale in uno spazio di Calabi-Yau - un fenomeno questo che le equazioni approssimate indicavano come perfettamente possibile, se non addirittura di ordinaria amministrazione nella teoria delle stringhe - le conseguenze sarebbero potute essere davvero catastrofiche. In effetti, le equazioni approssimate della teoria delle stringhe, ricavate dai fisici nella prima metà degli anni novanta, mostravano che, se si fosse prodotta una simile «strozzatura» nella trama dello spaziotempo, il meccanismo stesso dell'universo si sarebbe inceppato, perché alcuni «infiniti» che la teoria delle stringhe era riuscita ad addomesticare sarebbero stati nuovamente liberi di imperversare. Per alcuni anni i teorici delle stringhe dovettero convivere con questa idea fastidiosa e al tempo stesso non pienamente dimostrata. Ma nel 1995 Andrew Strominger riuscì a dimostrare che quelle apocalittiche previsioni erano del tutto infondate.

Strominger, basandosi su alcuni pionieristici lavori di Witten e Seiberg, fece uso dell'idea che la teoria delle stringhe, se analizzata con gli strumenti ben piú efficaci messi a disposizione dalla seconda rivoluzione delle superstringhe, non è piú soltanto una teoria di stringhe unidimensionali. Il suo ragionamento si può cosí sintetizzare. Una stringa unidimensionale -una uno-brana nel nuovo linguaggio della teoria - può circondare completamente una porzione di spazio unidimensionale, quale ad esempio una circonferenza, come illustrato nella figura 13.1. (Si osservi che questa figura è diversa dalla figura 11.6, in cui il foglio di universo di una stringa avvolge una sfera bidimensionale. La figura 13.1 dovrebbe essere considerata come un'istantanea, che fotografa la situazione a un certo istante). Analogamente, la figura 13.1 ci mostra che una membrana bidimensionale - una due-brana - può avvolgere e ricoprire completamente una sfera bidimensionale, nello stesso modo in cui un foglio di cellophane si può avvolgere sulla superficie di un'arancia. Sviluppando questa stessa idea in dimensione superiore - anche se può essere difficile da visualizzare -Strominger si rese conto che i nuovi ingredienti tridimensionali della teoria delle stringhe - le tre-brane - possono avvolgere e ricoprire completamente una sfera tridimensionale. Una volta capito questo, Strominger passò a dimostrare, con semplici calcoli fisici, che queste tre-brane «avvolte» costituiscono uno scudo protettivo in grado di neutralizzare esattamente gli effetti catastrofici che i fisici teorici temevano si potessero verificare a causa dell'eventuale collasso di una sfera tridimensionale.

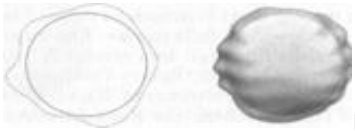

Figura 13. 1.
Una stringa può circondare una porzione di spazio unidimensionale; una membrana bidimensionale può avvolgere una regione bidimensionale.

Questa idea di Strominger era elegante e significativa, ma le sue vere potenzialità dovevano ancora essere sfruttate appieno, come si scoprì pochissimo tempo dopo.

3. Lo spazio si strappa – con convinzione.

Il bello della fisica è che lo stato dell'arte può cambiare letteralmente nel corso di una sola notte. Il mattino dopo che Strominger inviò il suo articolo all'archivio elettronico di Internet, io lo scaricai dalla rete e poi lo lessi nel mio studio della Cornell University. Strominger era riuscito a sfruttare abilmente le nuove, affascinanti idee della teoria delle stringhe per risolvere una delle questioni piú spinose riguardanti la compattificazione delle dimensioni spaziali extra in uno spazio di CalabiYau. Tuttavia, mentre riflettevo su questi brillanti risultati, mi venne in mente tutt'a un tratto che Strominger potesse aver scoperto soltanto una parte dell'intera faccenda.

Nel nostro precedente lavoro sulle transizioni attraverso flop, descritto nel capitolo XI, avevamo studiato processi geometrici articolati in due fasi: una sfera bidimensionale si contrae a un punto, provocando una strozzatura e quindi uno «strappo» nella trama dello spazio e successivamente si «gonfia» nuovamente, in un modo diverso, ricucendo lo « strappo » prodotto. Nel suo articolo, Strominger studiava invece che cosa succede quando una sfera tridimensionale si contrae a un punto, dimostrando che i nuovi oggetti estesi della teoria delle stringhe garantiscono che, anche in tali circostanze, non si verifichino effetti fisici patologici. Ma Strominger non si spingeva oltre. Non poteva darsi che ci fosse anche un'altra metà della storia? Che fosse possibile, cioè, proseguire in questa direzione, studiando anche lo «strappo »dello spazio e l'eventuale, successiva operazione di ricucitura?

Dave Morrison stava trascorrendo a Cornell il semestre primaverile del 1995, cosí quel pomeriggio stesso discutemmo insieme dell'articolo di Strominger. In un paio d'ore riuscimmo a capire quale potesse essere, a grandi linee, l'« altra metà della storia». Riprendendo alcune idee sviluppate a partire dalla fine degli anni ottanta dai matematici Herb Clemens della University of Utah, Robert Friedmann della Columbia University e Miles Reid della University of Warwick, e applicate poi da Candelas, Green e Tristan Hùbsch (che allora si trovava alla University of Texas a Austin), ci rendemmo conto che, quando una sfera tridimensionale si contrae a un punto in uno spazio di Calabi-Yau, è possibile che la trama geometrica di questo spazio si strappi e successivamente si ricucia se la sfera si «gonfia» di nuovo. Ma c'è una novità significativa. Mentre la sfera che si è contratta a un punto aveva tre dimensioni, la nuova sfera - quella che si gonfia dopo lo «strappo» - ha solamente due dimensioni. Non è assolutamente facile visualizzare quel che accade, ma possiamo farcene un'idea analizzando una situazione geometrica analoga in dimensione piú bassa. Invece di considerare il caso piuttosto complicato di una sfera tridimensionale che si contrae a un punto ed è poi sostituita da una sfera bidimensionale, studiamo una sfera unidimensionale che si contrae a un punto ed è poi sostituita da una sfera zero-dimensionale.

Ma che diavolo sono le sfere unidimensionali e quelle zero-dimensionali? Ragioniamo per analogia. Una sfera bidimensionale è l'insieme di tutti i punti dello spazio tridimensionale che si trovano alla stessa distanza da un punto assegnato, che è il centro della sfera, come si vede nella figura 13.2a. Seguendo la stessa idea, una sfera unidimensionale è l'insieme di tutti i punti dello spazio bidimensionale (la superficie di questa pagina, ad esempio) che si trovano alla stessa distanza da un punto centrale assegnato. Come mostra la figura 13.2b, la figura geometrica che risulta da questa costruzione non è altro che una circonferenza. Infine, attenendoci allo stesso schema di ragionamento, una sfera zero-dimensionale è l'insieme di tutti i punti di uno spazio unidimensionale (una retta) che si trovano alla stessa distanza da un punto centrale assegnato. La figura 13.2C mostra che una sfera zerodimensionale si riduce a due punti e che il suo « raggio » è uguale alla distanza di ciascun punto dal centro. E cosí l'analogia in dimensione piú bassa cui abbiamo accennato poco sopra consiste nel prendere una circonferenza (una sfera unidimensionale), contrarla fino a farla diventare un punto, produrre quindi uno « strappo » nello spazio e infine sostituire la sfera iniziale con una sfera zero-dimensionale (due punti). La figura 13.3 traduce in pratica questa idea astratta.

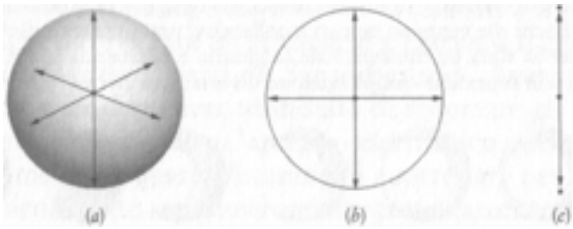

Figura 13.2.
Le sfere che si possono visualizzare facilmente: quella di dimensione due (a), di dimensione uno (b) e di dimensione zero (c) .

Consideriamo la superficie di una ciambella, nella quale sia immersa una sfera unidimensionale (una circonferenza), come evidenziato nella figura 13.3. Supponiamo ora che questa circonferenza si contragga, con il passare del tempo, fino a ridursi a un punto; in tal modo si crea una «strozzatura» nella superficie della ciambella. Possiamo riparare questa strozzatura «strappando » prima lo spazio e sostituendo poi la sfera unidimensionale originaria (la circonferenza che si è contratta a un punto) con una sfera zero-dimensionale (due punti), tappando i due buchi che lo strappo aveva prodotto nella parte superiore e inferiore dello spazio. Come si vede nella figura 13.3, lo spazio che cosí otteniamo sembra una banana ricurva, che può essere rimodellata, attraverso una serie di deformazioni lisce (dunque senza « strappi »), in una sfera bidimensionale. Vediamo cosí che, quando sostituiamo una sfera unidimensionale, dopo averla contratta a un punto,

con una sfera zero-dimensionale, la topologia della ciambella -cioè la sua forma fondamentale - viene drasticamente modificata. Nel contesto delle dimensioni arrotolate dello spaziotempo, la transizione topologica della figura 13.3 avrebbe l'effetto di trasformare l'universo illustrato nella figura 8.8 nell'universo illustrato nella figura 8.7

Sebbene questa sia soltanto un'analogia in dimensione piú bassa, coglie le caratteristiche essenziali della costruzione che Morrison e io pensavamo che potesse costituire l'«altra metà» dell'idea di Strominger. Dopo il collasso di una sfera tridimensionale immersa in uno spazio di Calabi-Yau, ci sembrava che lo spazio potesse prima strapparsi e poi «rattopparsi » da solo mediante una sfera bidimensionale, generando dei cambiamenti di topologia molto piú drastici di quelli precedentemente scoperti da Witten e da noi stessi nei nostri lavori sui flop (si veda il capitolo XI). In questo modo, si apriva la possibilità che lo spazio di CalabiYau si trasformasse in uno spazio di Calabi-Yau completamente differente - proprio come la ciambella si trasforma in una sfera bidimensionale nella figura 13.3 - e che tuttavia la fisica delle stringhe continuasse a comportarsi in maniera perfettamente regolare. Benché il quadro complessivo cominciasse a delinearsi con chiarezza, sapevamo bene che avremmo ancora dovuto verificare vari punti importanti prima di poter essere sicuri che la nostra «seconda metà della storia» non desse luogo ad alcuna singolarità; in altre parole, che non avesse conseguenze fisiche catastrofiche e inaccettabili.

Figura 13.3.
Una circonferenza in una ciambella (un toro) collassa a un punto e la superficie si strappa. Si producono cosi due buchi che vengono tappati incollandovi una sfera zero-dimensionale (due punti), che sostituisce la sfera unidimensionale originaria e rammenda lo strappo. La ciambella si trasforma in una superficie completamente diversa: una sfera.

Quella sera entrambi tornammo a casa euforici, con l'esaltante sensazione - sebbene ancora da confermare - di aver messo le mani su un'importante nuova idea.

4. Fioccano le e-mail.

La mattina dopo ricevetti una e-mail da parte di Strominger. Mi chiedeva che cosa pensassi del suo articolo e osservava che la sua costruzione «avrebbe dovuto avere qualche legame con il mio lavoro insieme con Aspinwall e Morrison». Anche Strominger - scoprii - stava infatti indagando il problema dell'esistenza di possibili connessioni con il fenomeno del cambiamento di topologia dello spaziotempo. Gli risposi immediatamente per e-mail, descrivendogli a grandi linee quel che avevamo trovato Morrison e io il giorno prima. Il tono della sua replica mi fece capire che il suo livello di eccitazione era del tutto paragonabile al nostro.

Nei giorni successivi, un incessante flusso di messaggi e-mail, che rimbalzavano tra Strominger, Morrison e me, accompagnò i nostri febbrili tentativi di dare un rigoroso fondamento quantitativo alle idee sulle nuove transizioni topologiche che avevamo scoperto. L'uno dopo l'altro, tutti i dettagli andarono a posto. Il mercoledì successivo - una settimana dopo che Strominger aveva diffuso per e-mail la sua idea iniziale - avevamo pronta la versione preliminare di un articolo a tre nomi, in cui si analizzavano le straordinarie trasformazioni della trama dello spazio che possono risultare dal collasso di una sfera tridimensionale.

Strominger doveva fare un seminario a Harvard il giorno seguente e cosí, la mattina presto, partì da Santa Barbara. Avevamo concordato che Morrison e io, dopo aver terminato di sistemare gli ultimi dettagli, avremmo inviato l'articolo all'archivio elettronico quella sera stessa. A mezzanotte meno un quarto finimmo di controllare per l'ennesima volta i nostri calcoli: tutto sembrava tornare perfettamente. Spedimmo l'articolo per e-mail e uscimmo dal dipartimento di fisica, incamminandoci verso la mia automobile (avrei dovuto riaccompagnare Morrison all'alloggio che aveva preso in affitto per il semestre a Cornell). Strada facendo, discutemmo ancora del lavoro provando a immaginare - in veste di avvocati del diavolo - le piú severe critiche che avrebbe potuto muoverci qualcuno fermamente deciso a non accettare i nostri risultati. Proprio mentre uscivamo dal parcheggio con la macchina e ci allontanavamo dal campus, arrivammo alla conclusione che le nostre argomentazioni, per quanto solide e convincenti, non erano però del tutto inattaccabili. Nessuno di noi due temeva che il lavoro potesse essere sbagliato, ma era indubbio che la forza delle nostre asserzioni e il modo in cui avevamo scelto di formulare le nostre idee in alcuni punti dell'articolo rischiavano di scatenare qualche aspra polemica,

che avrebbe potuto oscurare l'importanza dei risultati. Sarebbe stato meglio - convenimmo entrambi - riscrivere l'articolo in toni piú smorzati, senza enfatizzare troppo la rilevanza e la profondità dei nostri risultati e lasciando che la comunità dei fisici li giudicasse per quel che valevano, piuttosto che adottare uno stile di presentazione che avrebbe potuto dare adito a reazioni negative.

Mentre continuavo a guidare, Morrison mi ricordò che, secondo le regole di funzionamento dell'archivio elettronico, avevamo tempo di rivedere l'articolo fino alle due del mattino, ora in cui sarebbe diventato di dominio pubblico su Internet. Feci immediatamente inversione di marcia; ritornammo al dipartimento di fisica, ritirammo il file dalla rete e ci mettemmo al lavoro per limare la prosa. Fortunatamente il compito fu abbastanza facile - bastò cambiare poche parole nei passaggi piú delicati per attenuare l'enfasi di certe affermazioni senza alterare minimamente i contenuti tecnici. In un'ora avevamo finito. Inviammo di nuovo l'articolo all'archivio elettronico e decidemmo di non parlarne piú per tutto il viaggio fino alla casa di Morrison.

Già nel primo pomeriggio del giorno dopo fu chiaro che la reazione al nostro articolo era entusiastica. Tra i molti messaggi di e-mail che ci arrivarono, quello di Plesser conteneva uno dei complimenti piú lusinghieri che un fisico possa ricevere da un suo collega: «Mi sarebbe piaciuto aver avuto io l'idea! » Malgrado i nostri timori della notte prima, avevamo convinto la comunità dei teorici delle stringhe che la trama dello spazio può essere soggetta non solo agli «strappi» di modesta entità che avevamo scoperto nel nostro precedente lavoro (capitolo XI), ma anche a «lacerazioni» molto piú drastiche, come quella schematizzata nella figura 13-3.

5. Ancora su buchi neri e particelle elementari

Ma tutto questo ha forse qualcosa a che vedere con i buchi neri e le particelle elementari? Sí. Per lasciarci convincere dobbiamo partire dalla stessa domanda che ci siamo posti nel capitolo XI. Quali sono le conseguenze fisiche di questi strappi nella trama dello spazio? Nel caso delle transizioni attraverso flop - come abbiamo visto - la risposta, abbastanza sorprendente, a tale domanda è che non succede un granché. Anche le *transizioni attraverso singolarità coniche (conifold transitions) - il* nome tecnico che designa queste nuove transizioni che modificano la topologia dello spaziotempo - non provocano nessuna apocalisse cosmica (come accadrebbe invece secondo le leggi tradizionali della relatività generale), però hanno conseguenze osservabili piuttosto significative.

Sono due le idee, collegate tra loro, che stanno alla base di queste conseguenze osservabili: esaminiamole una alla volta. Abbiamo in primo luogo l'intuizione iniziale di Strominger, secondo cui una sfera tridimensionale immersa in uno spazio di Calabi-Yau può collassare senza scatenare catastrofi, dato che una tre-brana avvolta attorno ad essa fornisce un perfetto scudo protettivo. Ma qual è l'aspetto di una tale configurazione di brana? Questa domanda trova risposta in alcuni lavori precedenti di Horowitz e Strominger, nei quali si dimostra che per chi, come noi, ha cognizione diretta soltanto delle tre dimensioni spaziali estese, il campo gravitazionale prodotto dalla tre-brana «spalmata» attorno alla sfera tridimensionale apparirà simile a quello di un buco nero.

[2] Piú precisamente, questi sono esempi di buchi neri estremali: buchi neri, cioè, che hanno la minima massa possibile compatibilmente con le loro cariche di gauge (si noti l'analogia con gli stati BPS trattati nel capitolo XII). I buchi neri di questo genere avranno rilevanza anche nella discussione sull'entropia dei buchi neri.

Questo fatto, che *non* è affatto ovvio, diventa chiaro solo dopo aver analizzato in dettaglio le equazioni che governano le brane. Come al solito, è molto difficile rappresentare con precisione queste configurazioni di dimensione elevata in un disegno, ma nella figura 13.4 cerchiamo di illustrare schematicamente la situazione servendoci di sfere bidimensionali. Si vede dunque una membrana bidimensionale avvolta attorno a una sfera bidimensionale (immersa in uno spazio di Calabi-Yau, che occupa una certa posizione nelle tre dimensioni estese). Chi osservasse, attraverso le tre dimensioni estese, in direzione di questo spazio di Calabi-Yau, non rileverebbe altro che la massa e le cariche della brana « avvolta», proprietà queste che sono identiche - come hanno mostrato Horowitz e Strominger -a quelle di un buco nero. Nel suo pionieristico articolo del 1995, inoltre, Strominger asserisce che la massa della tre-brana - la massa del buco nero, cioè - è proporzionale al volume della sfera tridimensionale attorno alla quale è avvolta. Quanto maggiore è il volume della sfera, infatti, tanto piú grande, e dunque piú massiva, deve essere la tre-brana per riuscire a ricoprirla tutta. Viceversa, quanto minore è il volume della sfera, tanto minore risulta la massa della tre-brana. Di conseguenza, mentre questa sfera tridimensionale collassa e si contrae, la tre-brana attorno ad essa, che appare come un buco nero, diventa sempre piú

leggera. Quando la sfera si è ridotta a un punto singolare *(pinched), il* buco nero - tenetevi forte - diventa privo di massa. Sebbene ciò sembri a prima vista assolutamente misterioso - che diavolo può mai essere un buco nero senza massa? - vedremo tra breve come questo enigma apparente si inquadri nella teoria delle stringhe.

Il secondo elemento da tenere presente è il fatto che il numero di buchi di uno spazio di Calabi-Yau, come abbiamo mostrato nel capitolo IX, determina il numero di modi di vibrazione di stringa a bassa energia, e dunque molto poco massivi: quei modi di vibrazione, cioè, in termini dei quali si dovrebbero spiegare sia le particelle elementari elencate nella tabella 1.1, sia le particelle che mediano le interazioni fondamentali. Dato che le transizioni attraverso singolarità coniche cambiano il numero dei buchi (ad esempio, nella figura 13.3, il procedimento di « strappo » e ricucitura dello spazio elimina il buco della ciambella), ci aspettiamo che cambi anche il numero dei modi di vibrazione a bassa energia. In effetti, studiando in dettaglio il problema, Morrison, Strominger e io scoprimmo che, quando una sfera bidimensionale sostituisce, nelle dimensioni di CalabiYau. compattificate, una sfera tridimensionale che si è «strozzata» a un punto, il numero di modi di vibrazione di stringa di massa zero aumenta precisamente di uno. (L'esempio della ciambella che si trasforma in una sfera bidimensionale, illustrato nella figura 13.3, vi potrebbe indurre a credere che il numero di buchi - e dunque il numero di modi di vibrazione - diminuisca, ma tale proprietà dipende specificamente dal fatto che stiamo lavorando in dimensione piú bassa).

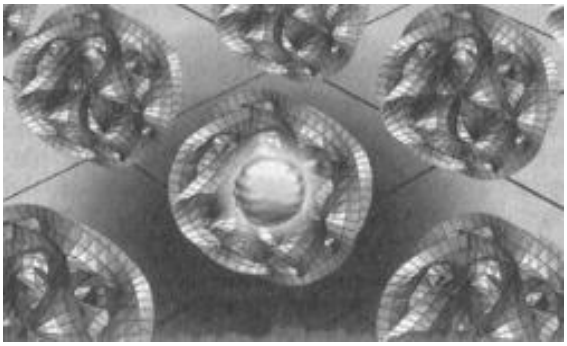

Figura 13.4.

Una membrana che si avvolge attorno a una sfera contenuta nelle dimensioni compattificate appare come un buco nero.

Per combinare le osservazioni dei paragrafi precedenti immaginiamo una sequenza di fotografie che ci mostrino uno spazio di Calabi-Yau contenente una certa sfera tridimensionale, il cui volume diventi sempre piú piccolo. Dalla prima osservazione consegue che anche la massa di una tre-brana avvolta attorno a questa sfera tridimensionale - che ci appare come un buco nero - diventerà sempre piú piccola; quando la sfera si sarà ridotta a un punto, la tre-brana avrà massa uguale a zero. Ma questo cosa significa? La risposta ci è suggerita dalla seconda osservazione. I nostri risultati mostravano infatti che il nuovo modo di vibrazione di stringa di massa nulla generato dalla transizione attraverso una singolarità conica è *la descrizione microscopica della particella di massa nulla in cui si* è *tramutato il buco nero.* Potevamo cosí concludere che, nel corso del processo in cui uno spazio di Calabi-Yau subisce una transizione attraverso una singolarità conica, un buco nero, inizialmente massivo, diventa via via piú leggero fino ad avere massa nulla e a questo punto si tramuta in una particella di massa nulla - ad esempio un fotone - che secondo la teoria delle stringhe altro non è che una stringa eccitata in un particolare modo di vibrazione. Con questa spiegazione, per la prima volta, la teoria stabiliva in modo esplicito una connessione diretta, concreta e quantitativamente incontrovertibile tra buchi neri e particelle elementari.

6. Buchi neri che si «sciolgono».

La connessione tra buchi neri e particelle elementari da noi scoperta è strettamente imparentata con fenomeni di cui capita a tutti di fare esperienza diretta nella vita di ogni giorno: le cosiddette *transizioni di fase.* L'esempio piú comune di transizione di fase è quello che abbiamo già menzionato nel capitolo XII: l'acqua può esistere in forma solida (ghiaccio), liquida oppure gassosa (vapore). Diciamo che queste sono le *fasi* dell'acqua e chiamiamo *transizione di fase il* passaggio da una fase all'altra. Morrison, Strominger e io mostrammo che sussiste una stretta analogia sia fisica sia matematica tra

queste transizioni di fase e le transizioni attraverso singolarità coniche da uno spazio di Calabi-Yau all'altro. Anche in questo caso - proprio come qualcuno che non avesse mai avuto esperienza dell'acqua liquida o del ghiaccio solido stenterebbe a riconoscere che queste sono due fasi della medesima sostanza fisica - i fisici non si erano mai resi conto del fatto che i particolari buchi neri che noi stavamo studiando e le particelle elementari sono in realtà due fasi del medesimo substrato di stringhe. Nello stesso modo in cui la temperatura determina la fase in cui si trova l'acqua, la forma topologica delle dimensioni di Calabi-Yau determina se certe configurazioni della teoria delle stringhe appariranno come buchi neri o come particelle elementari. In altre parole, nella fase iniziale - la forma iniziale dello spazio di Calabi-Yau (l'analogo della fase solida dell'acqua, diciamo) sono presenti certi buchi neri, mentre nella fase successiva - la forma che lo spazio di Calabi-Yau assume dopo la transizione attraverso singolarità coniche (la fase liquida dell'acqua) - questi buchi neri si « sciolgono», per cosí dire, trasformandosi in modi di vibrazione di stringa fondamentali. Lo « strappo » che lacera la trama dello spazio ci fa passare da una «fase di Calabi-Yau» ad un'altra. Vediamo cosí che buchi neri e particelle elementari - come ghiaccio e acqua - sono due facce della stessa medaglia. I buchi neri si inquadrano perfettamente nel contesto della teoria delle stringhe.

Abbiamo usato di proposito lo stesso paragone dell'acqua sia per queste trasformazioni che cambiano la topologia dello spaziotempo, sia per le trasformazioni che permettono di passare da una delle cinque formulazioni della teoria delle stringhe all'altra (capitolo XII), poiché sussiste una connessione profonda tra i due tipi di transizione. Vi ricorderete che le cinque teorie di stringa sono duali l'una all'altra e che esiste una teoria piú ampia che le unifica tutte, la M-teoria, illustrata schematicamente nella figura 12.11. Ma questa possibilità di muoversi con continuità da una formulazione all'altra - di partire da un punto qualsiasi della figura 12.11 riuscendo a raggiungere qualsiasi altro punto - rimane intatta anche se permettiamo che le dimensioni spaziali extra siano arrotolate in spazi di Calabi-Yau diversi? Prima della scoperta delle transizione attraverso singolarità coniche, si prevedeva che la risposta a questa domanda sarebbe stata no, perché nessuno aveva idea di come deformare con continuità uno spazio di Calabi-Yau in un altro. Ora sappiamo invece che la risposta è sí: mediante queste transizioni attraverso singolarità coniche, che hanno conseguenze fisiche osservabili, è possibile trasformare con continuità ogni dato spazio di Calabi-Yau in qualsiasi altro. Facendo variare le costanti di accoppiamento e la geometria degli spazi di Calabi-Yau si vede che tutte le descrizioni delle stringhe sono soltanto fasi differenti di una teoria unica. Anche dopo aver compattificato tutte le dimensioni extra, lo schema di unificazione rappresentato nella figura 12.11 rimane valido.

7. L'entropia dei buchi neri.

Alcuni tra i piú valenti fisici teorici avevano speculato per anni sull'eventuale esistenza di processi in grado di modificare la topologia dello spazio e sull'eventualità di una connessione tra buchi neri e particelle elementari. La scoperta della teoria delle stringhe, capace di fondere meccanica quantistica e relatività generale, ci ha permesso di dare un solido fondamento a queste idee, a prima vista quasi fantascientifiche. Questo successo ci incoraggia a domandarci se altri misteri del nostro universo, che per decenni hanno tenacemente resistito a ogni tentativo di spiegazione, non possano essere svelati grazie alla teoria delle stringhe. Tra questi enigmi in attesa di soluzione spicca per importanza la nozione di entropia dei buchi neri. Ed è proprio su questo terreno che la teoria delle stringhe ha mostrato tutte le sue potenzialità, riuscendo a risolvere un problema rimasto aperto per quasi un quarto di secolo.

L'entropia è una misura del disordine. Se per esempio la vostra scrivania è ingombra di libri aperti, ammonticchiati gli uni sugli altri, di vecchi giornali, di scartoffie, si trova allora in uno stato di grande disordine, ossia di elevata *entropia.* Se, al contrario gli articoli sono raccolti in cartelline debitamente etichettate, i giornali impilati in ordine cronologico, i libri disposti in ordine alfabetico per autore, le biro sistemate nell'apposito portapenne, la vostra scrivania si trova in uno stato di grande ordine, ossia di bassa entropia. Questo esempio, naturalmente, illustra solo l'idea intuitiva del concetto, mentre i fisici hanno elaborato una definizione rigorosamente quantitativa, che ci permette di descrivere l'entropia di un sistema fisico usando un valore numerico: numeri piú grandi significano entropia piú elevata, numeri piú piccoli entropia piú bassa. Benché la faccenda sia un po' piú complicata di cosí, possiamo dire per semplificare che questo numero conta tutte le possibili risistemazioni - i «riarrangiamenti» - degli elementi di un dato sistema fisico che lasciano inalterato il suo aspetto complessivo. Se la vostra scrivania è perfettamente a posto, quasi ogni riarrangiamento - che so, cambiare l'ordine dei giornali, dei libri o degli articoli, togliere le biro dal portapenne - turberà quell'ordine cosí metodico. Questa è la ragione per cui la scrivania si trova in uno stato di bassa entropia. Se invece sulla vostra scrivania regna il caos piú completo, vi saranno numerosi riarrangiamenti possibili dei giornali, degli articoli o delle scartoffie che lasceranno intatta quella

confusione e non modificheranno perciò l'aspetto complessivo del sistema. Questa è la ragione per cui la scrivania si trova in uno stato di elevata entropia.

Naturalmente, parlare di riarrangiamenti di libri, articoli e giornali su di una scrivania - e decidere quali di questi «lascia inalterato l'aspetto complessivo del sistema» - manca del necessario rigore scientifico. La definizione precisa di entropia si basa in realtà sul calcolo del numero dei possibili «riarrangiamenti» delle proprietà quantistiche microscopiche dei costituenti di un sistema fisico che non alterano le sue proprietà macroscopiche (quali l'energia o la pressione). I dettagli non sono essenziali, purché abbiate chiaro che l'entropia è concetto quantistico, rigorosamente quantitativo, che misura con precisione il disordine complessivo di un sistema fisico.

Nel *1970* Jacob Bekenstein, a quel tempo studente di dottorato a Princeton sotto la guida di John Wheeler, avanzò un'ipotesi audace. La sua idea era che i buchi neri potessero avere entropia, e un'entropia assai elevata. Per sostenerla, Bekenstein si appellava a una legge di natura che non manca certo di verifiche sperimentali, il venerabile *secondo principio della termodinamica,* che asserisce che l'entropia di un sistema aumenta sempre: tutto tende verso uno stato di maggior disordine. Anche se mettete in ordine la vostra scrivania ingombra di carte, diminuendo in tal modo la sua entropia, l'entropia totale -- che comprende quella del vostro corpo e dell'aria nella stanza - aumenterà. Per sistemare la vostra scrivania, in effetti, vi è necessario un certo dispendio di energia: affinché i vostri muscoli possano produrre questa energia, alcune delle ordinate molecole di grasso del vostro corpo si devono scindere e, per di piú, mentre vi affannate a mettere a posto, il vostro corpo emana calore, agitando cosí le molecole dell'aria circostante e provocando uno stato di maggiore disordine. Se teniamo conto di tutti questi effetti, la diminuzione di entropia della scrivania è piú che largamente compensata; di conseguenza, l'entropia totale aumenta.

Ma che cosa succede - ecco la domanda che si poneva Bekenstein se riordinate la vostra scrivania in prossimità dell'orizzonte degli eventi di un buco nero e fate in modo che tutte le molecole d'aria che avete messo in agitazione siano pompate nelle oscure profondità del buco nero? Possiamo essere ancora piú drastici: che cosa succede se tutta l'aria, tutti gli oggetti sulla scrivania e perfino la scrivania stessa vengono pompati nel buco nero e voi rimanete in una stanza fredda e senz'aria ma perfettamente in ordine? Dato che l'entropia della stanza è certamente diminuita - cosí ha ragionato Bekenstein - è necessario ammettere, per non violare il secondo principio della termodinamica, che il buco nero abbia entropia e che tale entropia aumenti in maniera sufficiente a controbilanciare la diminuzione di entropia che si osserva all'esterno di esso.

Bekenstein riuscì in effetti a rafforzare la sua argomentazione facendo ricorso a un famoso risultato di Stephen Hawking, che aveva provato che l'area dell'orizzonte degli eventi di un buco nero - ricordate, la superficie di non ritorno che ammanta ogni buco - aumenta sempre in ogni interazione fisica. Hawking aveva infatti dimostrato che se un asteroide cade in buco nero, o se una parte del gas superficiale di una stella vicina si concreziona al buco nero, o se due buchi neri entrano in collisione e si fondono - in tutti questi processi fisici, cosí come in qualsiasi altro, l'area totale dell'orizzonte degli eventi di un buco nero si accresce. A Bekenstein venne in mente che questo inesorabile aumento dell'area totale dovesse essere in qualche modo collegato all'inesorabile aumento dell'entropia totale previsto dal secondo principio della termodinamica. Avanzò cosí l'idea che l'area dell'orizzonte degli eventi fornisse una misura precisa dell'entropia di un buco nero.

Esaminando piú attentamente le cose, però, si scoprono due ragioni che inducono a dubitare della correttezza delle idee di Bekenstein - un dubbio condiviso dalla maggior parte dei fisici teorici di quell'epoca. In primo luogo, un buco nero sembrerebbe essere uno tra gli oggetti piú ordinati e rigidamente organizzati dell'intero universo. Una volta che abbiamo misurato la sua massa, le cariche di gauge di cui è provvisto e il suo spin, ecco che la sua identità è determinata in modo univoco. Essendo definito da cosí poche proprietà caratteristiche, la struttura di un buco nero sembra non permettere il disordine. Si può creare ben poco scompiglio su una scrivania su cui siano posati soltanto un libro e una matita; nello stesso modo, i buchi neri appaiono troppo semplici perché il disordine possa insorgere. La seconda ragione che rendeva difficile da digerire l'ipotesi di Bekenstein è che l'entropia, come abbiamo visto, è un concetto quantistico, mentre i buchi neri erano ancora di dominio esclusivo della relatività generale classica. All'inizio degli anni settanta, quando ancora non si aveva idea di come conciliare meccanica quantistica e relatività generale, sembrava quantomeno maldestro, nella migliore delle ipotesi, parlare di una possibile entropia dei buchi neri.

8. Quanto nero è il nero?

Anche a Hawking era capitato di pensare all'analogia tra la legge da lui stesso scoperta dell'aumento dell'area dell'orizzonte degli eventi di un buco nero e la legge dell'inarrestabile aumento dell'entropia, ma era giunto alla conclusione che si trattasse di una semplice coincidenza. Dopo tutto - aveva ragionato Hawking, basandosi sulla sua legge di aumento dell'area e su altri risultati che aveva ottenuto in collaborazione con James Bardeen e Brandon Carter - se si prendesse sul serio l'analogia tra le leggi dei buchi neri e le leggi della termodinamica, non soltanto si sarebbe costretti a identificare l'area dell'orizzonte degli eventi con l'entropia, ma si dovrebbe anche assegnare al buco nero una temperatura (il cui valore sarebbe determinato dall'intensità del campo gravitazionale del buco nero sull'orizzonte degli eventi). Ma se un buco nero ha una temperatura diversa dallo zero assoluto - non importa quanto bassa - i piú basilari e piú consolidati principi della fisica impongono che esso emetta radiazione, proprio come un attizzatoio arroventato. Ma i buchi neri, come tutti sanno, sono neri, e si deve quindi supporre che non emettano un bel niente. Hawking, e con lui la maggior parte dei fisici teorici, era convinto che questo ragionamento dimostrasse l'inammissibilità dell'ipotesi di Bekestein. Se in un buco nero cade della materia portando con sé una certa quantità di entropia, Hawking era invece disposto ad accettare l'idea che questa entropia venisse definitivamente perduta, punto e basta. In barba al secondo principio della termodinamica.

Cosí stavano le cose finché, nel 1974, Hawking non scoprì un fatto davvero stupefacente. I buchi neri - dichiarò Hawking - non sono completamente neri. Se si trascura la meccanica quantistica e si usano soltanto le leggi della relatività generale classica, allora è vero che i buchi neri (com'era stato scoperto circa sessant'anni prima) non permettono che nulla - nemmeno la luce - sfugga alla loro potente stretta gravitazionale. Ma se si tiene conto anche della meccanica quantistica, questa conclusione deve essere modificata radicalmente. Sebbene non disponesse di una formulazione quantistica della relatività generale, Hawking riuscì, con astuzia e abilità, a elaborare un'unione parziale di questi due strumenti teorici, il che gli consentì di ottenere alcuni risultati di portata limitata ma attendibili. E il risultato piú importante fu che i buchi neri, dal punto di vista quantistico, emettono radiazione.

I calcoli sono lunghi e alquanto complessi, ma l'idea di fondo è semplice. Abbiamo visto che, per via del principio di indeterminazione, anche il vuoto è tutto un frenetico brulicare e vorticare di particelle virtuali, che si creano, hanno una brevissima esistenza e subito si annichilano l'una con l'altra. Questa incessante agitazione quantistica si verifica anche nella regione di spazio che confina con l'orizzonte degli eventi di un buco nero. Hawking intuì che la forza gravitazionale del buco nero può fornire a una coppia di fotoni virtuali, poniamo, un surplus di energia sufficiente a separarli l'uno dall'altro quel tanto che basta perché uno dei due sia risucchiato nel buco nero. Una volta che il suo compagno è scomparso negli abissi del buco nero, l'altro fotone non può piú annichilarsi. Hawking dimostrò che questo fotone superstite riceve dall'intenso campo gravitazionale del buco nero una spinta, che lo fa schizzare via, allontanandolo dal centro mentre il suo compagno vi precipita dentro. Hawking concluse che, se osserviamo il buco nero (a debita distanza di sicurezza!), l'effetto combinato di questa separazione forzata di coppie di fotoni virtuali - ripetuta piú e piú volte in tutta la regione che circonda l'orizzonte degli eventi del buco nero - ci apparirà come un flusso costante di radiazione uscente. I buchi neri irradiano.

Hawking riuscì anche a calcolare quale temperatura un osservatore distante assocerebbe alla radiazione emessa, ottenendo che essa è data dall'intensità del campo gravitazionale sull'orizzonte degli eventi del buco nero, proprio come suggeriva l'analogia tra le leggi della termodinamica e le leggi che governano la fisica dei buchi neri.[3] La radiazione emessa da un buco dovrebbe essere del tutto simile a quella emessa da un forno caldo - e fu proprio questo problema della radiazione di corpo nero, come abbiamo visto all'inizio dei capitolo IV, a svolgere un ruolo determinante nella nascita della meccanica quantistica.

Bekenstein aveva ragione: i risultati di Hawking dimostravano che questa analogia doveva essere presa sul serio. Anzi, dimostravano che non si trattava di una semplice analogia, ma di una sostanziale identità. Un buco nero ha entropia. Un buco nero ha temperatura. Le leggi gravitazionali della fisica dei buchi neri altro non sono che una riformulazione delle leggi della termodinamica in un contesto gravitazionale estremamente particolare. Questa fu l'esplosiva conclusione raggiunta da Hawking nel 1974.

Per darvi un'idea di quali siano gli ordini di grandezza in gioco, un buco nero la cui massa totale è pari a circa tre volte quella del Sole risulta avere -una volta considerati con attenzione tutti i dettagli - una temperatura di circa un centomilionesimo di grado sopra lo zero assoluto. Non è zero, ma quasi. I buchi neri non sono neri, ma ci manca pochissimo. Purtroppo, questo fa sí che la radiazione emessa da un buco nero sia talmente esigua che è impossibile

rilevarla sperimentalmente. C'è tuttavia un'eccezione. I calcoli di Hawking mostrano anche che buchi meno massivi hanno temperature comparativamente piú alte ed emettono una maggiore quantità di radiazione. Per esempio, un buco nero leggero quanto un piccolo asteroide emetterebbe all'incirca la stessa radiazione di una bomba all'idrogeno da un milione di megatoni, e questa radiazione sarebbe tutta concentrata nella regione dello spettro elettromagnetico occupata dai raggi gamma. Gli astronomi hanno scrutato il cielo notturno alla ricerca di questa radiazione, ma non hanno trovato un bel niente, il che sembra indicare che questi buchi neri leggeri, se esistono, sono rarissimi.[4] In effetti, dato che i buchi neri che compaiono nelle transizioni attraverso singolarità coniche sono estremali, si dimostra che essi non emettono radiazione di Hawking, indipendentemente da quanto siano leggeri.

Ed è davvero un peccato - dice spesso Hakwing scherzando - perché se si riuscisse a rilevare la radiazione di buco nero prevista dai suoi risultati, lui vincerebbe di sicuro il premio Nobel.[5] Stephen Hawking, conferenza pronunciata al «Symposium on Gravity, Black Holes, and Strings», Amsterdam, 21 giugno 1997.

Se ora proviamo a calcolare l'entropia di un buco nero la cui massa è circa tre volte quella del Sole, otteniamo - in contrasto con la sua temperatura bassissima, inferiore al milionesimo di grado - un numero esorbitante: un 1 seguito da 78 zeri! E quanto piú massivo è il buco nero, tanto maggiore è l'entropia. I calcoli di Hawking ci mostrano inequivocabilmente che deve esserci un'enorme quantità di disordine incorporata in un buco nero.

Ma disordine di che cosa? Come abbiamo visto, i buchi neri sono oggetti estremamente semplici: da dove proviene allora questa enorme quantità di entropia? I calcoli di Hawking non dicevano assolutamente nulla a questo proposito. La sua fusione incompleta di relatività generale e meccanica quantistica poteva essere utile per determinare il valore numerico dell'entropia di un buco nero, ma non aiutava affatto a capire quale fosse il suo significato microscopico. Per quasi un quarto di secolo, alcuni tra i piú grandi fisici teorici hanno tentato di individuare possibili proprietà microscopiche dei buchi neri in grado di spiegare la loro entropia. Ma in mancanza di un'unificazione pienamente soddisfacente di relatività generale e meccanica quantistica, era possibile tutt'al piú trovare qualche frammento di verità, ma il mistero rimaneva insoluto.

9. Entra in scena la teoria delle stringhe.

O, per essere piú precisi, il mistero rimase tale fino al gennaio del 1996, quando Strominger e Vafa - partendo da risultati precedenti di Susskind e Sen - inviarono all'archivio elettronico di fisica un articolo intitolato «Origine microscopica dell'entropia di Bekenstein-Hawking ». In questo lavoro, Strominger e Vafa riuscivano a usare la teoria delle stringhe per identificare i costituenti microscopici di una certa classe di buchi neri e a calcolare con precisione l'entropia che ne risultava. I loro metodi sfruttavano la possibilità, da poco scoperta, di eludere le approssimazioni perturbative in uso negli anni ottanta e nei primi anni novanta e i risultati cui giungevano concordavano perfettamente con quelli previsti da Bekenstein e Hawking, completando cosí un mosaico le cui prime tessere erano state sistemate oltre due decenni prima.

Strominger e Vafa avevano concentrato la loro attenzione su una classe particolare di buchi neri, quelli cosiddetti *estremali.* Questi buchi neri sono saturi di carica - potete immaginare che si tratti di carica elettrica - e inoltre hanno la minima massa possibile che sia compatibile con la loro carica. Come potete vedere dalla definizione, essi appaiono strettamente collegati agli stati BPS, di cui abbiamo parlato nel capitolo XII. E Strominger e Vafa sfruttarono fino in fondo questa affinità. Mostrarono infatti che è possibile costruire - teoricamente, è naturale - certi buchi neri estremali partendo da un insieme particolare di stati BPS (di certe dimensioni specifiche) e assemblandoli insieme secondo un ben preciso schema matematico. Piú o meno nello stesso modo in cui un atomo può essere costruito - teoricamente, anche in questo caso - a partire da quark ed elettroni che si aggregano secondo un disegno preciso in protoni e neutroni, circondati da elettroni orbitanti, Strominger e Vafa provarono che i nuovi ingredienti della teoria delle stringhe potevano essere combinati per formare particolari buchi neri.

Nella realtà fisica, i buchi neri sono uno dei vari esiti possibili dell'evoluzione delle stelle. Quando una stella ha bruciato tutto il suo combustibile nucleare nel corso di miliardi di anni di reazioni di fusione nucleare, la pressione diretta verso l'esterno diventa insufficiente a contrastare l'enorme campo gravitazionale che preme verso l'interno. Si può allora scatenare - se sono verificate opportune condizioni iniziali una gigantesca implosione di tutta la massa della stella: quest'ultima collassa sotto il suo proprio peso e forma un buco nero. Invece di attenersi a questo processo di formazione

realistico, Strominger e Vafa optarono per buchi neri «progettati a tavolino». Capovolsero cosí la questione della formazione dei buchi neri, dimostrando che questi potevano essere costruiti - nella mente del fisico teorico - assemblando in maniera sistematica, attenta e meticolosa una ben precisa combinazione di brane, quegli strani oggetti scoperti dalla seconda rivoluzione delle superstringhe.

Questa impostazione si dimostrò estremamente efficace. Mantenendo il pieno controllo teorico sulla struttura microscopica dei loro buchi neri, Strominger e Vafa poterono dunque contare in modo semplice e diretto il numero dei possibili «riarrangiamenti» dei costituenti microscopici che avrebbero lasciato inalterate le sue proprietà osservabili cioè la massa e le cariche di gauge. Quando confrontarono il numero cosí ottenuto con l'area dell'orizzonte degli eventi ~ l'entropia prevista da Bekenstein e Hawking -trovarono che l'accordo era perfetto. Almeno nel caso dei buchi neri estremali, erano riusciti a usare la teoria delle stringhe per spiegare l'entropia di un buco nero in termini dei suoi costituenti microscopici. Un rompicapo risalente a quasi venticinque anni prima era stato risolto.[6] Nei loro calcoli iniziali, Strominger e Vafa lavorarono in cinque - non in quattro - dimensioni spaziali estese, perché il formalismo matematico diventava piú semplice. Dopo aver terminato il calcolo dell'entropia di un tale buco nero estremale in cinque dimensioni si accorsero con un certo stupore che nessun fisico aveva ancora costruito questo oggetto ipotetico nel contesto della relatività generale in cinque dimensioni. Dato che potevano confermare i loro risultati soltanto confrontando la risposta che avevano ottenuto con l'area dell'orizzonte degli eventi di un tale oggetto ipotetico, Strominger e Vafa si misero a costruirlo matematicamente. Dopo esserci riusciti, non ebbero difficoltà a dimostrare che il loro calcolo dell'entropia in termini di brane era in accordo con le previsioni di Hawking basate sull'area dell'orizzonte degli eventi. Ma è interessante osservare che, proprio perché il buco nero relativistico venne costruito soltanto in un secondo tempo, Strominger e Vafa non potevano conoscere la risposta che speravano di ottenere mentre eseguivano il calcolo iniziale dell'entropia usando la teoria delle stringhe. Successivamente, numerosi ricercatori - primo tra tutti il fisico di Princeton Curtis Callan - sono riusciti a estendere il calcolo dell'entropia dei buchi neri al caso piú tradizionale delle quattro dimensioni spaziotemporali; tutti i loro risultati sono in accordo con le previsioni di Hawking.

Molti teorici delle stringhe hanno considerato questo successo di Strominger e Vafa come un'importante e convincente prova a sostegno della teoria. La nostra comprensione della teoria delle stringhe è ancora troppo arretrata per consentirci di stabilire contatti precisi e diretti con le osservazioni sperimentali, ad esempio, della massa dell'elettrone o di un quark. Ma ora la teoria delle stringhe ha fornito la prima spiegazione fondamentale di una proprietà dei buchi neri, che per anni e anni aveva rappresentato una difficoltà insormontabile per i fisici che usavano teorie piú convenzionali. E questa proprietà è strettamente connessa alla previsione di Hawking che i buchi neri dovrebbero irradiare: una previsione che, in linea di principio, dovrebbe essere verificabile sperimentalmente. A tale scopo è necessario, naturalmente, che prima si riesca a individuare con certezza un buco nero e che si costruiscano poi apparecchiature abbastanza sensibili per captare la radiazione che esso emette. Se la massa del buco nero fosse sufficientemente piccola, il secondo passo si troverebbe alla portata della nostra attuale tecnologia. Anche se questo programma sperimentale non è stato ancora coronato da successo, mette in evidenza, una volta di piú, che quella distanza che ancora separa la teoria delle stringhe dalle descrizioni fisiche dei fenomeni naturali può essere colmata. Perfino Sheldon Glashow - che è stato l'acerrimo nemico della teoria delle stringhe per tutti gli anni ottanta - ha ammesso di recente che «quando i teorici delle stringhe parlano di buchi neri stanno parlando quasi di fenomeni osservabili; e questo fa il suo effetto ».[7] Conversazione con Sheldon Glashow, 29 dicembre 1997

10. I misteri ancora da risolvere.

Nonostante i notevoli progressi compiuti, ancora due misteri chiave circondano i buchi neri. Il primo riguarda le implicazioni che i buchi neri hanno sul concetto di determinismo. L'universo descritto dalle leggi del moto di Newton funziona come un meccanismo a orologeria; la conseguenza di maggiore portata che deriva da questa rigida concezione meccanicistica fu chiaramente evidenziata dal matematico francese Pietre Simon de Laplace all'inizio del diciannovesimo secolo:

Un intelletto che a un dato momento conoscesse tutte le forze che animano la Natura e le mutue posizioni di tutti gli enti che questa comprende, se questo stesso intelletto fosse sufficientemente vasto per sottoporre ad analisi questi dati, potrebbe condensare in una singola formula tanto il movimento dei piú grandi corpi dell'universo, quanto quello degli atomi piú leggeri: per tale intelletto nulla potrebbe essere incerto e il futuro, cosí come il passato, sarebbero presenti

ai suoi occhi.[8] Pierre-Simon de Laplace, *Essai philosophiquesur les probabilités* [18251, con una prefazione di R. Thom e una postfazione di B. Bru, Christian Bourgois, Paris 1986 [trad. it. Saggio sulle probabilità, La terza, Bari 1951; e in *Opere,* a cura di 0. Pesenti Cambursano, UTET, Torino 19671.

In altre parole, se si conoscono a un certo istante le posizioni e le velocità di tutte le singole particelle dell'universo, è possibile usare le leggi del moto di Newton per determinare - almeno in linea di principio

le loro posizioni e velocità in ogni altro istante passato o futuro. Da questo punto di vista, tutti gli eventi della storia del cosmo, dalla formazione del Sole alla crocifissione di Cristo, fino ai movimenti dei vostri occhi mentre leggono questa parola, seguono ineluttabilmente dalle posizioni e dalle velocità che avevano i costituenti elementari dell'universo subito dopo il big bang. Una concezione che prevede concatenazioni cosí rigide solleva certo ogni genere di perplessità filosofiche a proposito del libero arbitrio, ma c'è da dire che il suo impatto teorico è stato drasticamente ridimensionato dalla meccanica quantistica. Il principio di indeterminazione di Heisenberg, come abbiamo visto, mina alla radice il determinismo laplaciano, perché rende impossibile conoscere con precisione le posizioni e le velocità di tutte le particelle dell'universo. Queste quantità classiche sono sostituite da funzioni d'onda quantistiche, che descrivono la probabilità che una data particella occupi una certa posizione o abbia una certa velocità.

Ma il crollo della concezione di Laplace non trascina con sé anche il concetto di determinismo. Le funzioni d'onda - le distribuzioni di probabilità della meccanica quantistica - evolvono nel tempo obbedendo a ben precise regole matematiche, quali l'equazione di Schródinger (o le sue versioni piú corrette dal punto di vista relativistico, quali l'equazione di Dirac o l'equazione di Klein-Gordon). Il determinismo quantistico sostituisce il determinismo classico di Laplace. La conoscenza delle funzioni d'onda di tutti i costituenti fondamentali dell'universo a un dato istante permetterebbe a un «intelletto sufficientemente vasto» di determinare le funzioni d'onda in ogni altro istante passato o futuro. Il determinismo quantistico ci dice che la probabilità che un particolare evento si verifichi in un certo istante futuro è completamente determinata dalla conoscenza delle funzioni d'onda in qualunque istante passato. Il carattere probabilistico della meccanica quantistica attenua in misura considerevole l'ineluttabilità insita nel determinismo laplaciano, ma anche in questo contesto teorico gli stati futuri di un sistema continuano a essere completamente determinati da quelli passati.

Nel 1976 Hawking arrivò alla conclusione che i buchi neri violano anche questa forma debole di determinismo. I calcoli su cui si basa questo risultato sono - una volta di piú - estremamente complicati, ma l'idea di fondo si può afferrare con facilità. Se qualcosa cade in un buco nero, viene inghiottita anche la sua funzione d'onda. Ciò significa che il nostro «intelletto sufficientemente vasto», nel suo tentativo di calcolare le funzioni d'onda in tutti gli istanti futuri, viene defraudato in modo irreparabile. Per prevedere il futuro dobbiamo conoscere il presente, ma se una funzione d'onda si inabissa senza ritorno nelle profondità di un buco nero, l'informazione che essa trasporta è perduta per sempre.

A prima vista potrebbe sembrare che questa complicazione dovuta all'esistenza dei buchi neri non sia in fondo cosí preoccupante. Dato che tutto ciò che ha avuto la disgrazia di precipitare in un buco nero, trovandosi al di là dell'orizzonte degli eventi, non esercita piú alcuna influenza sul resto dell'universo, non potremmo limitarci a non tenerne conto? Da un punto di vista filosofico, potremmo inoltre sostenere che l'universo non ha perduto affatto l'informazione trasportata dalle cose inghiottite dal buco nero: questa informazione non è forse semplicemente imprigionata in una regione dello spazio che noi scegliamo, in quanto esseri razionali, di evitare a ogni costo? Prima che Hawking scoprisse che i buchi neri non sono completamente neri, la risposta a queste domande non poteva che essere affermativa. Ma le cose sono cambiate da quando sappiamo che i buchi neri irradiano. Siccome la radiazione trasporta energia, la massa di un buco nero che irradia diminuisce a poco a poco: evapora lentamente. Nel corso di questo processo, la distanza tra il centro del buco nero e l'orizzonte degli eventi si accorcia sempre di piú, e cosí, a poco a poco, quelle regioni dello spazio che questa impenetrabile barriera prima segregava al suo interno ristabiliscono i contatti con il resto del cosmo. Ma a questo punto le nostre elucubrazioni filosofiche non possono piú eludere l'interrogativo seguente: l'informazione inghiottita dal buco nero - quei dati che supponevamo fossero imprigionati al suo interno - riemerge oppure no quando il buco nero evapora? Questa informazione è necessaria per poter salvaguardare la validità del determinismo quantistico; rispondere alla domanda precedente è dunque cruciale per sapere se i buchi neri introducono nel nostro universo, a un livello molto profondo, un ulteriore elemento di casualità.

Ora come ora, mentre scrivo queste righe, i fisici sono divisi su tale questione. Hawking ha sostenuto con forza, per molti anni, che questi dati vanno irrimediabilmente perduti; i buchi neri distruggono l'informazione e generano cosí « un

livello di indeterminazione fisica che si aggiunge all'usuale indeterminazione quantistica».[9] Stephen Hawking, in Id. e Roger Penrose, *The Nature of Space and Time.,* Princeton University Press, Princeton 1995, P. 41 [trad. it. La *natura dello* spazio *e del tempo,* Sansoni, Milano 19961.

A questo proposito, Hawking, insieme con Kip Thorne, ha fatto una scommessa con John Preskill, anche lui del California Institute of Technology: Hawking e Thorne scommettono che l'informazione catturata da un buco nero vada perduta per sempre, mentre Preskill scommette, al contrario, che l'informazione riemerga a mano a mano che il buco nero irradia e si contrae. E la posta? Sempre informazione: « Chi vince riceverà da chi perde un'enciclopedia di sua scelta».

L'esito della scommessa è ancora in sospeso, ma Hawking ha ammesso di recente che le nuove conoscenze sui buchi neri derivanti dalla teoria delle stringhe suggeriscono l'idea che l'informazione potrebbe anche trovare il modo di riemergere.[10] Stephen Hawking, conferenza cit.

In effetti, per quel tipo di buchi neri studiati da Strominger e Vafa, e da molti altri fisici, l'informazione potrebbe essere immagazzinata nelle brane che costituiscono il buco nero, che permetterebbero cosí di recuperarla. Forti di questa idea, ha detto Strominger di recente, «molti fisici hanno pensato di poter cantare vittoria -asserendo che l'informazione viene recuperata a mano a mano che il buco nero evapora. A mio avviso, tuttavia, questa conclusione è prematura: rimane ancora molto lavoro da fare per accertare definitivamente la validità di questa ipotesi ».[11] Conversazione con Andrew Strominger, 29 gennaio 1997.

Vafa fa eco alle parole di Strominger, affermando di avere al proposito «una posizione agnostica: le cose potrebbero essere in un modo o nell'altro».[12] Conversazione con Cumrun Vafa, 12 gennaio 1998.

Risolvere la questione è un obiettivo primario della ricerca attuale. Come ha osservato Hawking:

La maggior parte dei fisici preferiscono credere che questa informazione non vada perduta, perché in questo modo viene salvaguardata la prevedibilità della natura. Io ritengo invece che, se prendiamo sul serio la relatività generale di Einstein, dobbiamo essere disposti a considerare la possibilità che lo spaziotempo si ripieghi e si annodi su se stesso e che l'informazione vada perduta in queste pieghe. Stabilire se l'informazione sia perduta per sempre oppure no è una delle piú importanti questioni della fisica teorica odierna.[13] Stephen Hawking, conferenza cit.

Il secondo mistero ancora insoluto riguarda la natura dello spaziotempo nel punto centrale del buco nero.[14] Questa seconda questione ha qualche punto di contatto con il problema della perdita di informazione, dato che alcuni fisici hanno ipotizzato che ci potrebbe essere un «nucleo » centrale nelle profondità di un buco,nero, in cui sia immagazzinata tutta l'informazione trasportata dalla materia che è rimasta intrappolata all'interno dell'orizzonte degli eventi.

Applicando le leggi della relatività generale, si trova che - come già era chiaro a Schwarzschild nel 1916 - a causa della massa e dell'energia enormi che sono compresse al centro del buco nero, la trama dello spaziotempo si flette fino ad avere una curvatura infinita, rompendosi cosí in maniera irreparabile; si forma cioè una singolarità spaziotemporale. Dato che tutta la materia che oltrepassa l'orizzonte degli eventi viene risucchiata nel centro del buco nero e, una volta arrivata là, non ha piú futuro, i fisici ne hanno dedotto che nella singolarità centrale del buco nero il tempo stesso finisca di esistere. Altri fisici, che hanno esplorato per anni le proprietà del centro dei buchi neri usando le equazioni di Einstein, hanno avanzato la sconcertante ipotesi che esso possa costituire il passaggio a un altro universo - i due universi sarebbero congiunti l'uno all'altro soltanto nel punto centrale di un buco nero. Per dirla in parole povere, quando il tempo finisce di esistere nel nostro universo, inizia a esistere nell'universo contiguo.

Le implicazioni di questa possibilità, che disorienta la nostra immaginazione, saranno esaminate nel prossimo capitolo; per il momento ci limiteremo a sottolineare un punto importante. Non dimentichiamo qual è la lezione principale che abbiamo imparato: in condizioni estreme di masse enormi e dimensioni molto ridotte, quando sono in gioco densità inimmaginabili, la teoria classica di Einstein, da sola, non è piú valida e si deve fare ricorso anche alla meccanica quantistica. Ma allora - dobbiamo domandarci - che cosa ci dice la teoria delle stringhe sulle singolarità dei buchi neri? Questo problema è oggi al centro di un'intensa attività di ricerca, ma rimane ancora insoluto, come la questione dell'informazione perduta. La teoria delle stringhe è in grado di trattare vari tipi di altre singolarità - gli « strappi » nella trama dello spazio di cui abbiamo parlato nel capitolo XI e all'inizio di questo capitolo .[15] Le transizioni attraverso singolarità coniche, che abbiamo descritto in questo capitolo, fanno entrare in gioco anche i buchi neri e si potrebbe dunque credere che siano collegate in qualche modo al problema delle singolarità dei buchi neri. Queste transizioni dello spaziotempo, come ricorderete, si verificano tuttavia quando il buco nero ha perduto tutta la sua massa e di conseguenza non hanno niente a che vedere con le singolarità dei buchi neri.

Ma conoscere alcune singolarità non significa affatto conoscerle tutte. Il nostro universo si può strappare, bucare,

lacerare in molti modi diversi. La teoria delle stringhe è riuscita a spiegare alcune di queste singolarità, ma altre -tra le quali le singolarità dei buchi neri - rimangono ancora al di fuori della sua portata. La ragione essenziale di questo insuccesso risiede, anche in questo caso, nell'uso dei metodi perturbativi, le cui approssimazioni ci impediscono di analizzare in modo esauriente e preciso le proprietà del punto centrale di un buco nero.

Ciò nonostante, gli enormi progressi che si sono compiuti di recente nell'uso dei metodi non perturbativi e gli importanti risultati che si sono cosí ottenuti applicandoli ad altri aspetti della fisica dei buchi neri, fanno sperare che potrebbe non essere lontano il momento in cui i misteri che riguardano la regione centrale dei buchi neri cominceranno finalmente a diradarsi.

Capitolo quattordicesimo
Riflessioni sulla cosmologia

Da sempre, nel corso della storia, gli uomini hanno cercato, con appassionata tenacia, di capire l'origine dell'universo. Forse piú di ogni altra questione, questa trascende le differenze tra epoche e culture e, cosí come accese la fantasia dei nostri progenitori nel lontano passato, ancora oggi ispira la ricerca dei cosmologi. E un anelito collettivo, a livello profondo, ciò che ci spinge a ricercare la spiegazione del perché esista un universo, di come abbia assunto la forma che osserviamo, della causa - del principio -che guida la sua evoluzione. E' davvero stupefacente che, al punto in cui è ora giunta l'umanità, si stia finalmente delineando uno schema concettuale che permette di rispondere ad alcune di queste domande in modo scientifico.

La teoria scientifica della creazione attualmente accettata afferma che l'universo, nei primi istanti della sua esistenza, sí trovò in condizioni estreme di energia, temperatura e densità enormi. Come ora ben sappiamo, per analizzare condizioni di questo genere si deve tener conto sia della gravità sia dei fenomeni quantistici; la nascita dell'universo costituisce dunque un eccellente banco di prova per la teoria delle superstringhe. Prima di occuparci di questi aspetti, vogliamo però descrivere brevemente la concezione cosmologica anteriore all'avvento delle stringhe, che è nota con il nome di *modello cosmologico standard.*

1. Il modello cosmologico standard.

La teoria moderna dell'origine del cosmo prese forma nei circa quindici anni successivi all'enunciazione definitiva da parte di Einstein della sua teoria della relatività generale. Al contrario di Einstein, che si rifiutava di prendere alla lettera la sua propria teoria e non accettava una delle sue conseguenze dirette, il fatto cioè che l'universo non è né statico né eterno, Aleksandr Fridman non esitò a farlo. Come abbiamo visto nel capitolo III, Fridman scoprì la cosiddetta *soluzione di big bang* delle equazioni di Einstein, in base alla quale l'universo ha avuto origine da uno stato in cui la materia era infinitamente compressa e in seguito a questa violenta esplosione continua a espandersi. Einstein era cosí fermamente convinto che la sua teoria non ammettesse simili soluzioni dipendenti dal tempo che pubblicò un breve articolo, nel quale sosteneva di aver individuato un errore fatale nel lavoro di Fridman. Circa otto mesi piú tardi, tuttavia, Fridman riuscì a convincere Einstein che, in effetti, non c'era nessun errore; Einstein ritrattò pubblicamente, ma in modo molto secco, la propria obiezione. E' chiaro comunque che Einstein riteneva che i risultati di Fridman non avessero alcuna attinenza con l'universo fisico. Piú o meno cinque anni dopo, però, le dettagliate osservazioni raccolte da Hubble, con il telescopio di 2,5 m dell'osservatorio di monte Wilson, su una dozzina di galassie, confermarono che l'universo è in espansione. Il lavoro di Fridman, riformulato in maniera piú sistematica ed efficace dai fisici Howard Robertson e Arthur Walker, costituisce ancora oggi il fondamento della cosmologia moderna.

In maniera un po' piú dettagliata, possiamo cosí riassumere la teoria moderna dell'origine del cosmo. Circa 15 miliardi di anni fa l'universo scaturì da un evento singolare, di enorme energia, dal quale si sprigionarono tutto lo spazio e tutta la materia. (Non dovete cercare molto lontano per localizzare il punto in cui si verificò il big bang: ebbe luogo là dove vi trovate in questo preciso momento e anche in qualsiasi altro punto, perché all'inizio tutti le posizioni che ora ci appaiono distinte erano la stessa). Si calcola che la temperatura dell'universo 10-43 secondi dopo il big bang - il cosiddetto

tempo di Planck - fosse pari a circa 1032 gradi Kelvin, piú o meno dieci milioni di miliardi di miliardi di volte piú elevata della temperatura all'interno del Sole. Con il trascorrere del tempo, l'universo si espanse e si raffreddò, e il plasma cosmico primordiale, inizialmente omogeneo, turbolento e caldissimo, cominciò a formare piccoli gorghi e addensamenti. Circa un centomillesimo di secondo dopo il big bang la temperatura si era sufficientemente abbassata (arrivando a circa diecimila miliardi di gradi Kelvin, piú o meno un milione di volte piú elevata della temperatura che si trova all'interno del Sole) perché i quark si potessero aggregare a gruppi di tre, formando protoni e neutroni. Circa un centesimo di secondo piú tardi, da questo plasma di particelle in fase di raffreddamento si coagularono i nuclei di alcuni degli elementi piú leggeri della tavola periodica. Nei tre minuti successivi, mentre l'universo sbolliva a poco a poco raffreddandosi fino alla temperatura di un miliardo di gradi Kelvin, continuarono a formarsi in grande prevalenza nuclei di idrogeno e di elio, insieme a poche tracce di deuterio (idrogeno «pesante ») e litio. Questo lasso di tempo è noto sotto il nome di *periodo della nucleosintesi primordiale.*

A questo punto, per alcune centinaia di migliaia di anni non accadde piú un granché, a parte il fatto che l'universo continuò a espandersi e raffreddarsi. Ma quando la temperatura si abbassò fino a raggiungere poche migliaia di gradi Kelvin, gli elettroni, che prima si agitavano sfrenatamente, rallentarono fino al punto che i nuclei atomici, in prevalenza di idrogeno ed elio, riuscirono a catturarli, formando i primi atomi elettricamente neutri. Fu un momento di cruciale importanza: da quell'istante in avanti, l'universo divenne, nel suo complesso, trasparente. Prima che gli elettroni fossero catturati dai nuclei atomici, l'universo era costituito da un denso plasma di particelle cariche - alcune di carica positiva, come i nuclei, altre di cariche negativa, come gli elettroni. I fotoni, che interagiscono soltanto con oggetti elettricamente carichi, erano incessantemente intralciati nel loro moto da questo brodo di particelle cariche e non riuscivano a percorrere nemmeno la piú piccola distanza senza essere assorbiti o deviati. Lo sbarramento delle particelle cariche, impedendo il libero moto dei fotoni, doveva far sí che l'universo apparisse quasi completamente opaco, abbastanza simile a ciò che vi sarà capitato di osservare in una mattina di nebbia fitta o in una tormenta di neve. Ma quando gli elettroni, di carica negativa, cominciarono a orbitare attorno ai nuclei, di carica positiva, producendo atomi elettricamente neutri, gli ostacoli delle cariche elettriche scomparvero e la fitta nebbia si diradò. Da quel momento in poi i fotoni emersi dal big bang poterono propagarsi liberamente, e l'universo divenne gradualmente visibile in tutta la sua estensione.

Piú o meno un miliardo di anni dopo, in un universo notevolmente piú calmo rispetto ai suoi inizi turbolenti, iniziarono a formarsi - a partire da addensamenti degli elementi primordiali tenuti insieme dall'attrazione gravitazionale - le galassie, le stelle e, per ultimi, i pianeti. Oggi, all'incirca 15 miliardi di anni dopo il big bang, ci deve fare meraviglia non solo la magnificenza del cosmo, ma anche la nostra capacità di aver elaborato un teoria dell'origine dell'universo sensata e verificabile sperimentalmente.

Ma dobbiamo davvero fidarci della teoria del big bang?

2. Il big bang messo alla prova.

Scrutando l'universo con i loro piú potenti telescopi, gli astronomi possono vedere la luce emessa da galassie e quasar soltanto pochi miliardi di anni dopo il big bang. Ciò ha permesso di verificare che, da quell'epoca remota, l'universo si è espanso in perfetto accordo con le previsioni della teoria del big bang. Ma per testare la teoria in fasi ancora precedenti della storia dell'universo i fisici e gli astronomi devono ricorrere a metodi piú indiretti. Uno degli strumenti di indagine piú sofisticati si basa sulla cosiddetta radiazione cosmica di fondo.

Se vi è mai capitato di toccare la camera d'aria di una bicicletta dopo averla gonfiata vigorosamente, saprete che si è riscaldata. Una parte dell'energia che avete speso per azionare la pompa si è convertita in un aumento di temperatura dell'aria contenuta nello pneumatico. La ragione di questo fenomeno sta nel fatto che, in generale, le cose diventano piú calde quando sono compresse. Anche l'opposto è vero: quando la pressione cala e le cose sono libere di espandersi, si raffreddano. Il funzionamento dei condizionatori d'aria e dei frigoriferi si basa proprio su questo principio: particolari sostanze, come ad esempio il freon, sono sottoposte a cicli ripetuti di compressione ed espansione (oppure di evaporazione e condensazione) in modo che il calore fluisca nella direzione voluta. Questi semplici fatti, molto terra terra, si possono trasporre a livello cosmico, con implicazioni profonde.

Come abbiamo visto, dopo che gli elettroni e i nuclei si combinarono gli uni con gli altri formando atomi elettricamente neutri, i fotoni furono liberi di propagarsi indisturbati attraverso l'intero universo. Ciò significa che un «gas

» di fotoni uniformemente distribuito riempie il cosmo. Durante l'espansione dell'universo anche questo gas si espande e, proprio come accade nel caso di un gas ordinario (ad esempio l'aria contenuta nello pneumatico), si raffredda. In effetti, già da molto tempo i fisici - negli anni cinquanta George Gamow e i suoi studenti Ralph Alpher e Robert Hermann, a metà degli anni sessanta Robert Dicke e Jim Peebles - hanno capito che l'universo attuale dovrebbe essere permeato in modo quasi uniforme da questi fotoni primordiali, che dopo *15* miliardi di anni di espansione cosmica si sono raffreddati a tal punto da raggiungere una temperatura di appena pochi gradi al di sopra dello zero assoluto.[1] Piú precisamente, l'universo dovrebbe essere popolato di fotoni corrispondenti alla radiazione termica emessa da un corpo perfettamente assorbente - un corpo nero, nel linguaggio della termodinamica - alla temperatura di 2,7 gradi Kelvin. Si tratta dello stesso spettro di radiazione emesso, in accordo con le leggi della meccanica quantistica, dai buchi neri (come dimostrato da Hawking) o da un forno caldo (come dimostrato da Planck).

Nel *1965* Arno Penzias e Robert Wilson, entrambi alle dipendenze dei Bell Laboratories nel New Jesey, fecero del tutto casualmente una delle piú importanti scoperte della nostra epoca, rilevando questo residuo del big bang mentre lavoravano con un'antenna originariamente destinata alle comunicazioni via satellite. Le ricerche successive hanno perfezionato tanto la teoria quanto gli esperimenti, culminando nelle misurazioni effettuate dal satellite COBE *(Cosmic Background Explorer)* della Nasa nei primi anni novanta. Questi dati hanno confermato ai fisici e agli astronomi, con un alto grado di precisione sperimentale, che l'universo è riempito da una radiazione a microonde (se i nostri occhi fossero sensibili alle microonde, vedremmo attorno a noi uno scialbo chiarore diffuso), la cui temperatura è di circa 2,7 gradi al di sopra dello zero assoluto, in perfetto accordo con le previsioni della teoria del big bang. In termini concreti, in ogni metro cubo dell'universo - compreso quello che ora vi circonda - vi sono, in media, circa 400 milioni di fotoni, che tutti insieme costituiscono il vasto mare cosmico della radiazione a microonde, un'eco remota della creazione. Una certa percentuale della «neve» che vedete sullo schermo del televisore quando staccate il cavo e vi sintonizzate su una stazione che non trasmette, è dovuta a questi tenui residui del big bang. L'accordo tra la teoria e i dati sperimentali conferma la concezione cosmologica del big bang a partire dal momento in cui i fotoni cominciarono a viaggiare liberamente attraverso l'universo, ovvero alcune centinaia di migliaia di anni dopo l'esplosione (ATB, cioè *after the bang).*

Ma è possibile, con i nostri esperimenti volti a verificare la teoria del big bang, risalire ancora piú indietro nel tempo? Sí, è possibile. Applicando i principi di base della fisica nucleare e della termodinamica, i fisici sono in grado di fare «predizioni» precise riguardo alle quantità relative degli elementi leggeri prodotti durante il periodo della nucleosintesi primordiale, da un centesimo di secondo fino a pochi secondi ATB. Secondo la teoria, ad esempio, circa il 23 per cento dell'universo dovrebbe essere composto di elio. Misurando la quantità di elio presente nelle stelle e nelle nebulose, gli astronomi hanno accumulato un'impressionante mole di dati a sostegno del fatto che questa «predizione» colpisce effettivamente nel segno. Forse ancor piú sensazionale è la conferma della «predizione» che riguarda il deuterio, dato che non esiste sostanzialmente nessun processo astrofisico che possa spiegare la quantità - piccola ma esattamente determinata - di questo elemento presente nell'universo. Queste conferme sperimentali - a cui si è aggiunta di recente quella relativa al litio - costituiscono una prova significativa a favore della correttezza delle nostre idee sulla fisica dell'universo nel suo stato iniziale, all'epoca della sintesi primordiale di questi elementi.

Questi risultati sono cosí stupefacenti che ci potrebbero quasi indurre a peccare di presunzione. Tutti i dati in nostro possesso confermano una teoria cosmologica capace di descrivere l'universo per un periodo di 15 miliardi di anni, da circa un centesimo di secondo ATB fino a oggi. Non dobbiamo tuttavia dimenticare che l'evoluzione iniziale dell'universo fu straordinariamente rapida. Minuscole frazioni di secondo - molto, ma molto piú piccole di un centesimo di secondo - costituiscono epoche cosmiche nel corso delle quali alcune caratteristiche del mondo che ci circonda rimasero fissate una volta per tutte. E cosí i fisici hanno continuato le loro ricerche, indirizzando i loro tentativi di spiegare l'universo a epoche ancora piú remote della sua esistenza. Dato che piú ci spingiamo indietro nel tempo, piú l'universo diventa piccolo, caldo e denso, è essenziale disporre di un'accurata descrizione quantistica della materia e delle forze. Come abbiamo visto in altri contesti nei capitoli precedenti, la teoria quantistica di campo delle particelle puntiformi funziona bene finché l'energia media delle particelle è dell'ordine dell'energia di Planck. In ambito cosmologico queste condizioni si verificarono quando l'intero universo era ridotto a un granello delle dimensioni di Planck, con una densità talmente grande da oltrepassare l'umana capacità di trovare una metafora calzante o un'illuminante analogia: la densità dell'universo al tempo di Planck era semplicemente colossale. Quando sono in gioco energie e densità cosí enormi i fenomeni quantistici e la gravità non possono piú essere studiati separatamente gli uni dall'altra, cosí come si fa nella teoria quantistica di campo delle particelle puntiformi. Il messaggio principale che cerca di trasmettere questo libro è che a simili energie (e superiori) si deve fare ricorso alla teoria delle stringhe. In termini temporali, ci imbattiamo in energie e densità di questo ordine di grandezza non appena cerchiamo di descrivere l'evoluzione dell'universo prima di 10-43

secondi ATB - il tempo di Planck, appunto - e sono dunque questi primissimi istanti di vita dell'universo a rappresentare il banco di prova cosmologico della teoria delle stringhe.

Ma facciamo un passo alla volta: prima di risalire a questa era cosí remota vediamo che cosa ci dice il modello cosmologico standard sull'evoluzione dell'universo nell'intervallo compreso tra il tempo di Planck e un centesimo di secondo ATB,

3. Dal tempo di Planck a un centesimo di secondo ATB

Come ricorderete dal capitolo VII (e in particolare dalla figura 7. 1), nell'ambiente estremamente caldo dell'universo primordiale le tre forze non gravitazionali si fondono insieme. I calcoli dei fisici, che descrivono in che modo variano le intensità di queste forze con l'energia e la temperatura, mostrano che anteriormente a circa 10-35 secondi ATB la forza forte, quella debole e quella elettromagnetica erano unificate in un'unica «superforza» (o forza di grande unificazione). In questo stato l'universo era di gran lunga piú simmetrico di quanto non sia ora. Nello stesso modo in cui metalli diversi, se portati a una temperatura sufficientemente elevata, danno luogo a un liquido di fusione omogeneo, cosí tutte le differenze significative che oggi osserviamo tra le forze si cancellano nelle condizioni estreme di energia e temperatura caratteristiche dell'universo nei suoi primi istanti di esistenza. Ma con il trascorrere del tempo, man mano che l'universo si espandeva e si raffreddava, questa simmetria - come dimostra la teoria quantistica dei campi - si riduce drasticamente attraverso una serie di passaggi piuttosto bruschi, il cui esito finale è l'asimmetria delle forze che ci è familiare.

Non è difficile capire la fisica che sta dietro a un tale processo di riduzione di simmetria, o rottura di simmetria, come si dice piú propriamente. Immaginiamoci un grosso recipiente pieno d'acqua. Le molecole di H_2O sono distribuite in maniera uniforme nel recipiente e l'acqua appare sempre la stessa, indipendentemente dalla direzione in cui la guardiamo. Osserviamo ora il recipiente mentre facciamo scendere la temperatura. Inizialmente non accade un granché; a livello microscopico, la velocità media delle molecole d'acqua diminuisce, nulla di piú o quasi. Ma quando la temperatura si abbassa fino a zero gradi Celsius, si verifica improvvisamente un cambiamento notevole. L'acqua liquida comincia a solidificarsi, diventando ghiaccio. Come abbiamo già sottolineato nei capitoli precedenti, questo è un semplice esempio di transizione di fase. Ai fini del ragionamento in corso, la cosa importante da osservare è che la transizione di fase produce l'effetto di ridurre la simmetria dell'insieme di molecole di H_2O contenute nel recipiente. Mentre l'acqua appare la stessa indipendentemente dalla direzione in cui la si guarda - ha, cioè, una simmetria rotazionale -, non è cosí per il ghiaccio. Questo ha infatti una struttura cristallina, il che significa che se lo esaminate con accuratezza, apparirà diverso - come tutti i cristalli - a seconda della direzione in cui lo si osserva. La transizione di fase ha prodotto un'evidente diminuzione della simmetria rotazionale complessiva del sistema.

Questo è solo un esempio che tutti conosciamo bene, ma il nocciolo della questione è vero anche in un contesto piú generale: se abbassiamo la temperatura di molti sistemi fisici, a un certo punto questi subiscono una transizione di fase il cui effetto tipico consiste in una diminuzione o «rottura» di alcune delle simmetrie preesistenti. Un sistema può attraversare varie transizioni di fase se la sua temperatura varia in un insieme di valori abbastanza ampio. L'acqua, nuovamente, ci permette di fare un esempio semplice. Se consideriamo H_2O a una temperatura maggiore di 100 gradi Celsius, abbiamo un gas: il vapore acqueo. In questa forma il sistema ha una simmetria ancora maggiore di quella che possiede nella fase liquida, dato che le singole molecole di H_2O non sono piú assoggettate ai legami che le uniscono nella forma liquida. Al contrario, esse sono libere di schizzare in tutte le direzioni all'interno del recipiente, in condizioni di assoluta parità, senza che si formino addensamenti o «grumi» in cui alcune molecole scelgono di unirsi piú strettamente isolandosi dalle altre. Se la temperatura è abbastanza elevata regna la democrazia molecolare. Naturalmente, non appena facciamo scendere la temperatura sotto i 100 gradi, il sistema subisce una transizione di fase gas-liquido, nella quale si formano piccole gocce d'acqua che riducono la simmetria. Se continuiamo ad abbassare la temperatura non accade nulla di particolarmente significativo finché non arriviamo a zero gradi Celsius, quando la transizione di fase acqua-ghiaccio - come abbiamo visto - produce un'altra brusca rottura di simmetria.

I fisici ritengono che nell'intervallo di tempo compreso tra il tempo di Planck e un centesimo di secondo ATB l'universo si comportò in maniera analoga, subendo almeno due transizioni di fase. A temperature superiori a 1028 gradi Kelvin, le tre forze non gravitazionali non sono distinte e si ha la massima simmetria possibile (al termine del capitolo discuteremo della possibile inclusione della forza gravitazionale, grazie alla teoria delle stringhe, in questa unificazione alle

alte temperature). Non appena la temperatura scese al di sotto di 1028 gradi Kelvin, si verificò una transizione di fase in cui le tre forze si «cristallizzarono » in forme diverse, spezzando la loro unione precedente. Le loro intensità relative e le modalità con cui ciascuna di esse agisce sulla materia cominciarono a differenziarsi. Nell'universo diventato piú freddo la completa simmetria che sussisteva a temperature piú elevate era rotta definitivamente. Ciò nonostante, il lavoro di Glashow, Salam e Weinberg (si veda il capitolo V) dimostra che non si cancellò tutta la simmetria propria delle alte temperature: la forza debole e quella elettromagnetica erano ancora strettamente legate l'una all'altra. Mentre l'universo continuava a espandersi e a raffreddarsi ulteriormente, non accadde niente di significativo finché la temperatura non raggiunse i 1015 gradi Kelvin - un valore circa 100 milioni di volte superiore alla temperatura del nucleo solare. A questo punto si verificò una seconda transizione di fase, che interessò la forza debole e quella elettromagnetica: a quella temperatura, infatti, le due forze si separarono e le loro differenze diventarono sempre piú marcate man mano che l'universo continuava a raffreddarsi. A queste due transizioni di fase dobbiamo dunque imputare l'esistenza delle tre forze non gravitazionali distinte che agiscono nel mondo che ci circonda, ma la storia del cosmo - che abbiamo brevemente riassunto - mostra la relazione profonda che le unisce.

4. Un rompicapo cosmologico.

Questa teoria cosmologica che descrive l'era successiva al tempo di Planck ci fornisce uno schema elegante, coerente e abbordabile dal punto di vista dei calcoli per capire l'evoluzione dell'universo fin dai primissimi istanti dopo il big bang. Ma come per la maggior parte delle buone teorie, la nostra maggiore comprensione delle cose genera nuovi problemi, che riguardano dettagli sempre piú fini. Alcuni di questi problemi, pur senza invalidare il modello cosmologico standard, mettono in evidenza certi suoi aspetti poco soddisfacenti, che indicano la necessità di una teoria piú profonda. Concentriamoci su uno di questi, il cosiddetto *problema dell'orizzonte,* che rappresenta una delle piú importanti questioni della cosmologia odierna.

L'analisi dettagliata della radiazione cosmica di fondo ha mostrato che, indipendentemente dalla direzione in cui puntiamo nel cielo l'antenna, la temperatura della radiazione che misuriamo è sempre la stessa, con un errore di circa una parte su 100.000. Riflettendoci un momento, la cosa appare alquanto strana. Perché mai due diverse regioni del cosmo, che possono essere separate da distanze enormi, dovrebbero avere temperature che si corrispondono con tanta precisione? Questo problema sembra avere una soluzione ovvia: sí certo, due regioni del cielo diametralmente opposte sono lontanissime oggi, ma - come due gemelli separati alla nascita - si trovavano molto vicine (tutto era molto vicino, del resto) nei primi istanti di vita dell'universo. Dato che hanno un'origine comune, non è affatto sorprendente in fin dei conti che abbiano varie proprietà fisiche in comune, come ad esempio la temperatura.

Ma questa argomentazione, nell'ambito del modello cosmologico standard, non sta in piedi. Vediamo perché. Una scodella di minestra bollente che si raffredda pian piano fino a raggiungere la temperatura ambiente si trova a contatto con l'aria circostante, piú fredda. Se si aspetta abbastanza a lungo, la temperatura della minestra e dell'aria nella stanza diventeranno esattamente uguali. Ma se la minestra è contenuta in un thermos, come tutti sanno, rimarrà calda per molto piú tempo, dato che gli scambi con l'ambiente esterno sono assai ridotti. Questo semplice esempio ci insegna che il raggiungimento dell'equilibrio termico tra due corpi dipende dalla possibilità di uno scambio di informazioni prolungato e non ostacolato. Di conseguenza, per verificare l'attendibilità dell'idea che le due regioni del cosmo hanno la stessa temperatura a causa della loro iniziale vicinanza, dobbiamo stabilire con quale efficacia si sono scambiate informazioni nell'universo primordiale. A questo proposito la contiguità spaziale, da sola, non basta; anche la durata temporale ha la sua importanza.

Per analizzare piú in dettaglio questo punto, immaginiamo di studiare un film dell'espansione cosmica, ma un film che scorra a ritroso nel tempo, da oggi fino all'istante del big bang. Dato che nessun segnale o informazione può propagarsi a una velocità superiore a quella della luce, le due regioni sono in grado di scambiare calore l'una con l'altra (e hanno dunque la possibilità di raggiungere la stessa temperatura) solo se la loro distanza a un dato istante è minore della distanza che la luce può aver percorso dal momento del big bang fino ad allora. Scatta cosí una specie di gara: le due regioni si avvicinano sempre di piú ma le lancette dell'orologio cosmico si spostano sempre piú indietro. Chi avrà la meglio ? Ad esempio, se per avere una distanza di 300.000 chilometri, il nostro film deve riavvolgersi fino a meno di un secondo ATB, le due regioni non possono in alcun modo interagire dato che la luce impiegherebbe un intero secondo per viaggiare dall'una all'altra.[2] Il ragionamento cerca di rendere l'idea di fondo sorvolando su alcune sottigliezze che hanno a che

vedere con il moto della luce in un universo in espansione e che modificano i dati numerici. In particolare, sebbene la relatività ristretta stabilisca che niente può viaggiare piú veloce della luce, ciò non impedisce affatto che due fotoni trascinati dallo spazio in espansione si allontanino l'uno dall'altro con una velocità superiore a quella della luce. Ad esempio, nel momento in cui l'universo divenne per la prima volta trasparente, circa 300.000 anni ATB, regioni distanti circa 900.000 anni luce avrebbero avuto la possibilità di interagire l'una con l'altra (nonostante questa distanza sia molto maggiore di 300.000 anni luce). Il fattore 3 in eccesso è conseguenza dell'espansione dello spazio. Questi dettagli, tuttavia, non alterano la sostanza del ragionamento.

Se per diminuire ancora di piú la loro distanza, riducendola, poniamo, ad appena 300 chilometri, dovessimo spingerci fino a meno di un millesimo di secondo ATB, ecco che di nuovo non concluderemmo un bel nulla: la luce in meno di un millesimo di secondo percorre meno di 300 chilometri. E si potrebbe andare avanti: se le due regioni fossero separate solo da una trentina di centimetri l'una dall'altra quando il nostro film si è riavvolto fino a meno di un milionesimo di secondo ATB, ogni reciproca influenza risulterebbe ancora impossibile, perché alla luce manca il tempo, dopo il big bang, di coprire questo breve intervallo. Come si vede, anche se due punti dell'universo, andando indietro nel tempo, si avvicinano sempre di piú, ciò non vuol affatto dire che possano aver avuto scambi termici, al contrario della minestra e dell'aria circostante.

I fisici hanno calcolato che nel modello cosmologico standard si presenta esattamente il problema illustrato da questi esempi: regioni del cosmo che sono ora separate da distanze enormi non hanno mai avuto il tempo di scambiare calore l'una con l'altra, e cosí non c'è modo di spiegare per quale motivo si trovino alla stessa temperatura. Questa inspiegabile uniformità della temperatura nel cosmo si chiama appunto pro*blema dell'orizzonte (il* termine «orizzonte» allude a quanto lontano può viaggiare la luce, per cosí dire). Ciò non significa che il modello standard sia sbagliato del tutto, ma di sicuro qualcosa non funziona come dovrebbe. Nel 1979 il fisico Alan Guth - ora al Massachusetts Institute of Technology - mise le cose a posto.

5. Inflazione.

Alla base del problema dell'orizzonte sta il fatto che due regioni del cosmo oggi immensamente lontane non hanno mai potuto esercitare alcuna influenza fisica l'una sull'altra, perché anche quando si sono trovate abbastanza vicine nessun segnale ha mai avuto il tempo di metterle in contatto reciproco. In altre parole, la difficoltà è che, proiettando all'indietro il film della storia del cosmo e avvicinandosi all'istante del big bang, l'universo non si contrae abbastanza rapidamente.

Una volta chiarita l'idea di fondo, cerchiamo ora di precisare meglio la questione. Proprio come succede con una palla lanciata in aria, il punto è che la forza gravitazionale rallenta la velocità di espansione. Ciò significa, ad esempio, che per dimezzare la distanza tra due regioni del cosmo dobbiamo piú che dimezzare il tempo trascorso dopo il big bang. Di conseguenza, non è detto che le due regioni riescano a comunicare l'una con l'altra anche se si avvicinano sempre di piú.

Quale fu la soluzione proposta da Guth? Trovò un'altra soluzione delle equazioni di Einstein, in base alla quale l'universo subito dopo il big bang attraversò una breve fase di espansione enormemente rapida un periodo durante il quale le sue dimensioni si dilatano *(inflate)* a un ritmo esponenziale. A differenza di una palla lanciata in aria che rallenta man mano che sale piú in alto, l'espansione esponenziale accelera sempre di piú. Quando il film ci ripropone a ritroso la storia del cosmo, osserveremo dunque una contrazione che decelera molto rapidamente. Ciò significa che per dimezzare la distanza tra due punti del cosmo (durante l'epoca di espansione esponenziale) ci potremo fermare molto prima della metà del tempo trascorso dopo il big bang. In tal modo, le nostre due regioni hanno il tempo di scambiare calore e possono dunque raggiungere la stessa temperatura.

Grazie alla scoperta di Guth e a successivi miglioramenti della teoria dovuti a Andrei Linde (ora a Stanford), Paul Steinhardt, Andreas Albrecht (allora alla University of Pennsylvania) e molti altri, il modello standard fu emendato nel modello cosmologico *inflazionario.* La modifica riguarda un brevissimo intervallo di tempo - all'incirca tra i 10-36 e i 10-34 secondi ATB - durante il quale l'universo subì un'espansione colossale, moltiplicando il proprio raggio di un fattore pari ad almeno 1030, immensamente piú grande del fattore all'incirca uguale a 100 previsto dal modello standard. Ciò significa che in un miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo le dimensioni dell'universo aumentarono in percentuale maggiore che durante i successivi 15 miliardi di anni. Prima di questa violenta espansione, la materia che ora occupa regioni del cosmo lontanissime l'una dall'altra si trovava ad essere molto piú vicina di quanto

previsto del modello cosmologico standard, il che rese possibile il raggiungimento di una temperatura comune. In questo modo, il modello di Guth - in base al quale la breve inflazione iniziale è seguita da un'espansione uguale a quella dal modello standard -risolve il problema dell'orizzonte (come anche vari altri problemi cosmologici, sui quali non ci soffermiamo) ed è ora accettato da gran parte dei cosmologi.[3] Per una esposizione dettagliata e avvincente della cosmologia inflazionaria si rimanda al volume di Alan Guth, *The Inflationary Universe,* Addison-Wesley, Reading (Mass.) 1997.

La figura 14. 1 riassume la storia dell'universo secondo questa teoria, dal tempo di Planck fino all'epoca presente.

6. La cosmologia e la teoria delle superstringhe.

Rimane un brevissimo tratto della figura 14. 1, tra il big bang e il tempo di Planck, che non abbiamo ancora studiato. Applicando pedissequamente le equazioni della relatività generale a questo intervallo di tempo, i fisici hanno supposto che l'universo continui a contrarsi, diventando sempre piú caldo e piú denso man mano che ci si avvicina all'istante del big bang. Al tempo zero, le dimensioni dell'universo si annullano, mentre la temperatura e la densità schizzano all'infinito, il che dimostra che questo modello di evoluzione dell'universo - la cui matrice teorica è la relatività generale - è palesemente inadeguato.

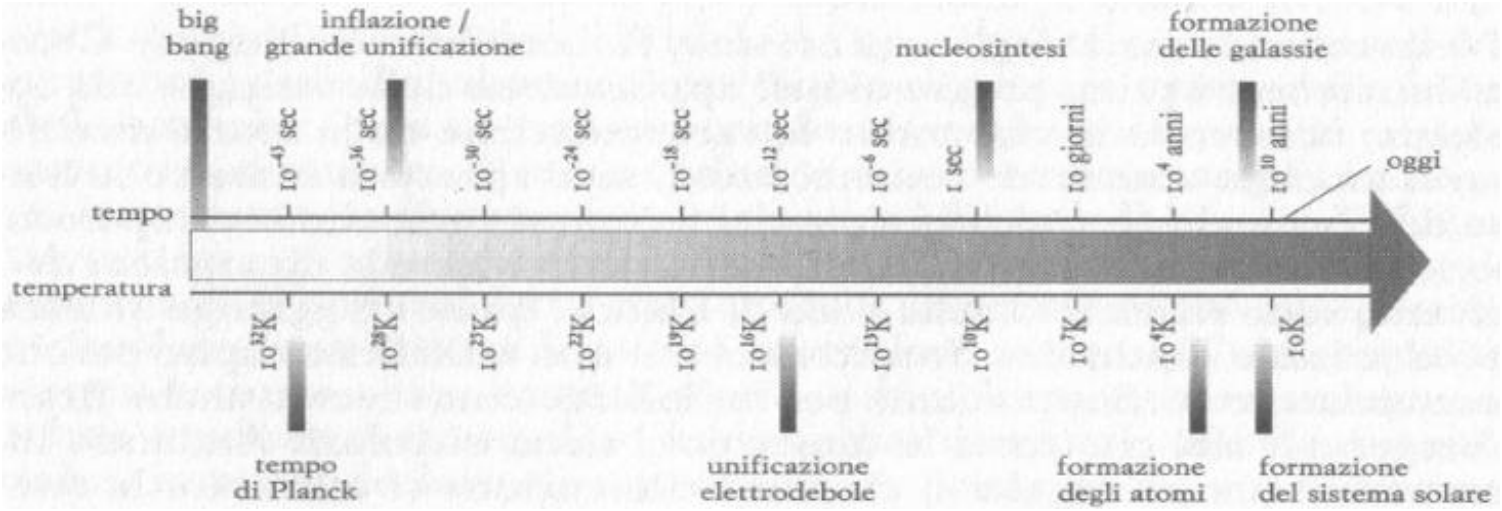

Figura 14.1.
I momenti chiave della storia dell'universo.

La natura ci fa intendere a chiare lettere che in condizioni estreme come quelle che si producono in prossimità del big bang è necessario unificare relatività generale e meccanica quantistica: in altre parole, si deve ricorrere alla teoria delle stringhe. Le ricerche sulle implicazioni cosmologiche delle stringhe sono ancora agli inizi. I metodi perturbativi possono fornire, nella migliore delle ipotesi, soltanto indicazioni sommarie, dato che valori cosí elevati dell'energia, della temperatura e della densità richiedono un'analisi di precisione. Sebbene alcune tecniche non perturbative siano già state sviluppate dalla seconda rivoluzione delle superstringhe, ci vorrà ancora del tempo perché siano abbastanza potenti e accurate per affrontare il tipo di calcoli che si presentano nei problemi cosmologici. Ciò nonostante, nell'ultimo decennio i fisici sono riusciti a fare i primi passi nell'elaborazione di modelli cosmologici basati sulla teoria delle stringhe. Ecco quali sono i risultati che hanno finora raggiunto.

Ci sono essenzialmente tre modi in cui la teoria delle stringhe modifica il modello cosmologico standard. Primo - in un senso che la ricerca attuale sta ancora cercando di precisare - la teoria delle stringhe implica che le dimensioni dell'universo non possano ridursi al di sotto di un certo minimo. Questo fatto è in netto contrasto con l'asserzione del modello standard secondo cui l'universo si contrae fino ad avere dimensione zero al momento del big bang. Secondo, esiste una dualità raggio R-raggio 1/R (strettamente connessa al punto precedente), che ha importanti conseguenze cosmologiche, come vedremo tra poco. Terzo, ci sono piú di quattro dimensioni spaziotemporali; si rende dunque

necessario studiare l'evoluzione di tutte quante. Esaminiamo questi aspetti in maggior dettaglio.

7. In principio fu un granellino delle dimensioni di Planck.

Nella seconda metà degli anni ottanta, Robert Brandenberger e Cumrum Vafa fecero i primi progressi nell'applicazione delle stringhe alla cosmologia, chiarendo in che modo le caratteristiche della teoria modifichino il modello standard. Innanzi tutto, se si spostano indietro le lancette dell' 'orologio fino al principio dei tempi, si vede che la temperatura continua ad aumentare fino al momento in cui tutte le dimensioni dell'universo sono all'incirca della scala di Planck, quindi raggiunge un *massimo* ed inizia a diminuire. Intuitivamente non è difficile capire perché le cose vadano cosí. Supponiamo per semplicità (come fecero anche Brandenberger e Vafa) che tutte le dimensioni siano circolari. Andando indietro nel tempo, il raggio di ciascuna dimensione si contrae e la temperatura aumenta. Ma sappiamo che, secondo la teoria delle stringhe, quando i raggi collassano al di sotto della lunghezza di Planck, la fisica che ne risulta è identica a quella che si osserva quando i raggi si dilatano assumendo valori superiori alla lunghezza di Planck. Di conseguenza, il vano tentativo di contrarre le dimensioni dell'universo al di sotto della scala di Planck si traduce nel fatto che la temperatura raggiunge un valore massimo e inizia quindi a diminuire (dato che l'universo è in espansione). Brandenberger e Vafa verificarono l'esattezza di questa descrizione mediante calcoli precisi.

Il modello cosmologico che ne deriva si può cosí riassumere. In principio tutte le dimensioni spaziali previste dalla teoria sono arrotolate e hanno estensione minima, pari a circa la lunghezza di Planck. La temperatura e l'energia sono molto elevate, ma non infinite (la teoria evita tutti i paradossi che insorgono se si permette che l'universo si riduca a un punto di dimensione zero). In questo istante iniziale, dunque, tutte le dimensioni spaziali sono in condizioni di perfetta parità - sono cioè completamente simmetriche -, arrotolate in un granellino multidimensionale delle dimensioni di Planck. Secondo Brandenberger e Vafa, la prima rottura di simmetria si produce, piú o meno al tempo di Planck, quando tre dimensioni spaziali iniziano a espandersi, mentre le altre conservano la loro estensione originaria. Queste tre dimensioni spaziali sono allora identificate con quelle la cui evoluzione è descritta dal modello cosmologico inflazionario, riassunto nella figura 14.1: le tre dimensioni che ci sono familiari.

8. Perché tre?

Perché mai e in che modo - viene subito da domandarsi - la riduzione di simmetria seleziona per l'espansione precisamente tre dimensioni spaziali? Cioè, al di là del fatto sperimentale che soltanto tre dimensioni spaziali si sono espanse fino a diventare osservabili, la teoria delle stringhe fornisce una ragione fondamentale del perché cosí non è stato per un numero diverso di dimensioni o addirittura per tutte quante, in maniera perfettamente simmetrica? Brandenberger e Vafa hanno trovato una spiegazione possibile. Vi ricorderete che la dualità raggio *R* raggio *1/R* si basa sul fatto che, quando una dimensione compattificata è circolare, una stringa le si può arrotolare attorno. Come un elastico stretto attorno a una camera d'aria di bicicletta, queste stringhe arrotolate tendono a strangolare le dimensioni attorno alle quali sono avvolte, impedendo loro di espandersi. A prima vista, ciò sembrerebbe avere come conseguenza che ogni dimensione sia destinata a rimanere compressa, dato che le stringhe possono avvolgerle tutte indistintamente (e cosí effettivamente è). Ma c'è una scappatoia: se una stringa arrotolata interagisce con la corrispondente antistringa (grosso modo, una stringa arrotolata nella direzione opposta), allora entrambe si annichilano l'una con l'altra, producendo una stringa non arrotolata. Se questo processo avviene con sufficiente rapidità ed efficacia, un numero abbastanza elevato di «elastici» verrà eliminato e alcune dimensioni potranno espandersi. L'idea di Brandenberger e Vafa è che questo effetto si produce soltanto per tre dimensioni spaziali. Vediamo perché.

Immaginiamo due particelle che scorrono su una retta, come nello scenario di Linelandia. A meno che non abbiano velocità identiche, prima o poi una finirà per raggiungere l'altra e si avrà una collisione. Si osservi, tuttavia, che se queste stesse particelle si muovessero a caso in un piano bidimensionale (si pensi al territorio di Flatlandia), uno scontro tra le due sarebbe estremamente improbabile. La seconda dimensione spaziale offre a ciascuna particella un'infinità di traiettorie diverse, la maggior parte delle quali non passano per lo stesso punto allo stesso istante. Se il numero delle dimensioni aumenta ancora, diventa sempre piú improbabile che le due particelle possano entrare in collisione. Brandenberger e Vafa si resero conto che qualcosa di analogo succede anche nel caso di stringhe chiuse arrotolate attorno a dimensioni spaziali. Benché non sia facile da visualizzare, se ci sono soltanto tre dimensioni spaziali (o un numero

minore), è probabile che due stringhe arrotolate entrino in collisione l'una con l'altra, come succede per due particelle su una retta. Se invece le dimensioni spaziali sono almeno quattro, allora lo scontro tra due stringhe arrotolate diventa sempre piú improbabile all'aumentare del numero di dimensioni, come nel caso di due particelle che si muovono in uno spazio avente due o piú dimensioni.[4] Per il lettore con una propensione verso la matematica, l'idea che motiva questa conclusione si può spiegare piú o meno cosí. Se la somma delle dimensioni dei cammini «spazzati »dai due oggetti in movimento è maggiore o uguale alla dimensione spaziotemporale dello scenario nel quale si muovono, allora essi si intersecheranno (genericamente). Ad esempio, le particelle puntiformi spazzano cammini unidimensionali e dunque la somma delle dimensioni di due cammini di questo tipo è uguale a due. La dimensione spaziotemporale di Linelandia è anch'essa uguale a due e pertanto i due cammini si intersecheranno (a meno che le velocità delle due particelle non siano esattamente uguali). Analogamente, il foglio di universo spazzato da una stringa in movimento è bidimensionale: per due stringhe la somma delle dimensioni è dunque quattro. Ciò significa che due stringhe che si muovono in quattro dimensioni spaziotemporali si intersecheranno (generalmente).

Ecco allora come vanno le cose. Nei primi istanti di vita dell'universo, a causa dell'agitazione dovuta alla temperatura elevatissima (ma finita), tutte le dimensioni circolari tentano di espandersi. Ma le stringhe arrotolate attorno ad esse impediscono questa espansione, facendo sí che tutti i raggi rimangano circa della lunghezza di Planck. Prima o poi, tuttavia, per una fluttuazione termica casuale, accadrà che tre dimensioni diventino temporaneamente piú grandi delle altre; sarà dunque molto probabile che le stringhe avvolte attorno a queste dimensioni interagiscano le une con le altre. Circa la metà di queste collisioni interesserà coppie stringa/antistringa e si verificheranno perciò annichilazioni che faranno diminuire sempre di piú l'effetto di «strangolamento», agevolando cosí l'espansione delle tre dimensioni.

Piú queste dimensioni si espandono, meno diventa probabile che le altre stringhe riescano ad avvolgerle, perché una stringa ha bisogno di maggiore energia per circondare una dimensione piú grande. In questo modo, l'espansione si autosostiene. Possiamo ora immaginare che queste tre dimensioni spaziali continuino a evolversi nella maniera descritta nei paragrafi precedenti, generando l'universo osservabile.

9. Gli spazi di Calabi-Yau in cosmologia.

Brandenberger e Vafa supposero, per semplicità, che tutte le dimensioni spaziali fossero circolari. In effetti, come si è già osservato nel capitolo VIII, questa assunzione può essere compatibile con la forma osservata dell'universo a condizione che il raggio delle tre dimensioni spaziali macroscopiche sia tanto grande da eccedere il potere dei nostri strumenti. Ma per quanto riguarda le dimensioni che rimangono piccole, un'ipotesi piú realistica è che siano compattificate in uno spazio di Calabi-Yau piú complicato. Naturalmente, la domanda cruciale è: quale spazio di CalabiYau? E in che modo è determinato? Nessuno è stato finora in grado di rispondere a questi interrogativi. Tuttavia, combinando i risultati sulle transizioni topologiche descritte nel capitolo precedente con le nuove idee cosmologiche, possiamo suggerire un possibile scenario teorico. Sappiamo che ogni singolo spazio di Calabi-Yau si può trasformare in qualsiasi altro mediante transizioni attraverso singolarità coniche. Possiamo dunque supporre che nei tumultuosi e caldissimi istanti che seguono il big bang, la componente di Calabi-Yau dello spazio rimane piccola, ma subisce una ridda frenetica di trasformazioni, nelle quali la sua trama si strappa e si ricuce, assumendo cosí tutta una lunga serie di differenti strutture di CalabiYau. Man mano che l'universo si raffredda e tre dimensioni spaziali continuano a espandersi, queste transizioni si fanno sempre piú rade, finché le dimensioni extra si fissano in uno spazio di Calabi-Yau definitivo, quello che dovrebbe dare origine alle proprietà fisiche dell'universo che ci circonda. Il difficile problema che i fisici devono affrontare è quello di capire, nel dettaglio, l'evoluzione della componente di Calabi-Yau dello spazio, in modo che la sua forma attuale possa essere prevista sulla base di principi teorici. Data la nostra capacità di trasformare ogni spazio di CalabiYau in qualsiasi altro, la questione di selezionare uno specifico spazio di Calabi-Yau tra i molti possibili può essere ridotta a un problema di cosmologia.[5] Con la scoperta della M-teoria, le dimensioni spaziali sono diventate undici: i fisici teorici hanno perciò iniziato a studiare il problema di compattificare sette dimensioni extra in maniera che siano tutte piú o meno sullo stesso piede di parità. Le possibili scelte per questi spazi a sette dimensioni prendono il nome di varietà di Joyce, dal matematico di Oxford Dominic Joyce che ha scoperto la tecniche matematiche per costruirle.

10. Prima dell'inizio?

In mancanza delle equazioni esatte della teoria delle stringhe, Brandenberger e Vafa furono costretti a fare numerose approssimazioni e svariate assunzioni nei loro lavori di cosmologia. Come Vafa si è espresso di recente:

I nostri risultati fanno emergere un modo nuovo di affrontare, mediante la teoria delle stringhe, alcuni problemi cosmologici che resistono da tempo ai metodi standard. Vediamo, ad esempio, che la teoria delle stringhe permette di evitare completamente la nozione stessa di singolarità iniziale. Tuttavia, a causa della difficoltà - allo stato attuale delle conoscenze -di eseguire calcoli del tutto attendibili in situazioni fisiche cosí estreme, il nostro lavoro costituisce soltanto il primo passo verso una «cosmologia di stringa» e molto ancora si dovrà scoprire.[6] Conversazione con Cumrun Vafa, 12 gennaio 1998.

Importanti progressi in questa direzione sono stati compiuti da vari fisici, in primo luogo da Gabriele Veneziano e dal suo collaboratore Maurizio Gasperini, dell'Università di Torino. Questi due ricercatori hanno elaborato una loro interessante versione della cosmologia di stringa, che pur mantenendo alcune caratteristiche del modello precedente se ne differenzia in maniera significativa. Come Brandenberger e Vafa, anche Veneziano e Gasperini si basano sulla teoria delle stringhe per ottenere una lunghezza minima ed evitare cosí la temperatura e la densità di energia infinite che si presentano nel modello inflazionario standard. Ma invece di concludere che l'universo è nato sotto forma dì un granello estremamente caldo delle dimensioni della scala di Planck, avanzano l'ipotesi che ci possa essere una *preistoria,* che inizia molto prima di quello che abbiamo finora chiamato tempo zero e il cui risultato finale è proprio questo embrione cosmico planckiano.

Secondo questa teoria, gli inizi del cosmo furono radicalmente diversi da quel che prevede il modello standard. Invece di essere estremamente caldo e compresso in un minuscolo volume spaziale, l'universo primordiale -sostengono Veneziano e Gasperini - appariva freddo e infinitamente esteso. Le equazioni della teoria delle stringhe mostrano che in queste ipotesi la presenza di un'instabilità innescherebbe un processo autosostenuto (simile a quello che si osserva nell'epoca inflazionaria del modello di Guth) e tutti i punti dell'universo sarebbero costretti ad allontanarsi molto rapidamente l'uno dall'altro. Di conseguenza, lo spazio diventerebbe sempre piú curvo e si avrebbe dunque un consistente aumento della temperatura e della densità di energia.[7] Il lettore esperto osserverà che questa descrizione avviene nel cosiddetto sistema di riferimento di stringa, nel quale l'aumento della curvatura nel periodo pre-big bang deriva da un aumento *(dilaton-driven increase)* dell'intensità della forza gravitazionale. Nel sistema di riferimento di Einstein l'evoluzione sarebbe descritta da una fase di contrazione accelerata.

Trascorso un certo tempo, una regione tridimensionale di questo universo, delle dimensioni di un millimetro cubo, avrebbe le stesse caratteristiche del grumo supercaldo e superdenso che emerge dall'espansione inflazionaria. L'universo che ci è familiare può essere spiegato come il risultato dell'espansione di questo grumo iniziale - un'espansione che avviene in accordo al modello cosmologico standard. Si osservi che, in questo scenario pre-big bang, la soluzione del problema dell'orizzonte è immediata. Secondo le parole di Gabriele Veneziano, «la teoria delle stringhe ci offre una versione della cosmologia inflazionaria su un piatto d'argento ».8 Conversazione con Gabriele Veneziano, 19 maggio, 1998

Lo studio della cosmologia dal punto di vista della teoria delle superstringhe sta rapidamente diventando un campo di ricerca assai fertile e attivo. L'ipotesi di Gasperini e Veneziano, ad esempio, ha suscitato un acceso dibattito e non è affatto chiaro quale ruolo svolgerà nello schema cosmologico finale che sarà elaborato a partire dalla teoria delle stringhe. Portare a compimento queste idee ancora abbozzate dipenderà, naturalmente, dalla capacità dei fisici teorici di realizzare il programma indicato dalla seconda rivoluzione delle superstringhe. Quali sono, ad esempio, le conseguenze cosmologiche dell'esistenza di brane di dimensione elevata? Come cambiano le proprietà cosmologiche che abbiamo illustrato se la teoria di stringa ha una costante di accoppiamento il cui valore sta piú o meno nel centro della figura 12. 11 piuttosto che in una delle regioni peninsulari? In altre parole quali sono le implicazioni della M-teoria sui primissimi istanti di vita dell'universo? Questi problemi fondamentali sono oggi al centro di una intensa attività di ricerca. Un'idea importante è già stata chiarita.

11. La M-teoria e la fusione di tutte le forze.

Nella figura *7.* 1 abbiamo mostrato in che modo le intensità delle tre forze non gravitazionali tendono a coincidere man mano che la temperatura dell'universo diventa sempre piú elevata. Che cosa si può dire della forza gravitazionale? Prima della comparsa della M-teoria, ì fisici erano riusciti a dimostrare che, con la scelta piú semplice tra tutti i possibili spazi di CalabiYau per la componente compattificata dello spazio, la forza gravitazionale si fonde soltanto in maniera imperfetta

con le altre tre, come illustra la figura 14.2. Questa discrepanza poteva essere evitata modellando con cura la forma dello spazio di Calabi-Yau e mettendo in atto altri piccoli trucchi del mestiere, ma queste sistemazioni a posteriori sono sempre insoddisfacenti per un fisico. Dato che nessuno è in grado di prevedere quale sia la forma precisa delle dimensioni di Calabi-Yau, sembra piuttosto azzardato fondare le proprie conclusioni sulla soluzione di problemi che sono cosí strettamente collegati a tali dettagli.

Witten ha dimostrato che la seconda rivoluzione delle superstringhe offre una soluzione molto piú convincente. Studiando come varia l'intensità delle forze anche per valori non necessariamente piccoli della costante di accoppiamento, Witten ha infatti scoperto che la curva che descrive la forza gravitazionale può essere lievemente aggiustata in modo da incontrare le curve delle altre tre forze, come nella figura 14.2, senza dover richiedere che lo spazio di Calabi-Yau abbia una qualche forma particolare. Anche se forse è troppo presto per dirlo, questo risultato potrebbe indicare che l'unità cosmologica si può forse conseguire con maggiore facilità nel contesto piú ampio della M-teoria.

Gli sviluppi illustrati nel presente paragrafo e in quelli precedenti rappresentano i primi passi, ancora incerti, verso una piena comprensione delle implicazioni cosmologiche della M-teoria. 1 fisici prevedono che negli anni a venire, con il perfezionarsi dei metodi non perturbativi, dall'applicazione di queste idee ai problemi cosmologici emergeranno molti risultati nuovi e profondi.

Ma anche se i metodi attualmente disponibili non sono abbastanza potenti, può valere ugualmente la pena di riflettere sul possibile ruolo della cosmologia nella ricerca della teoria ultima. Alcune delle considerazioni che svolgeremo, pur essendo di natura piú speculativa rispetto agli argomenti che abbiamo trattato nei capitoli precedenti, sollevano interrogativi fondamentali che nessuna teoria candidata a essere «definitiva» può eludere.

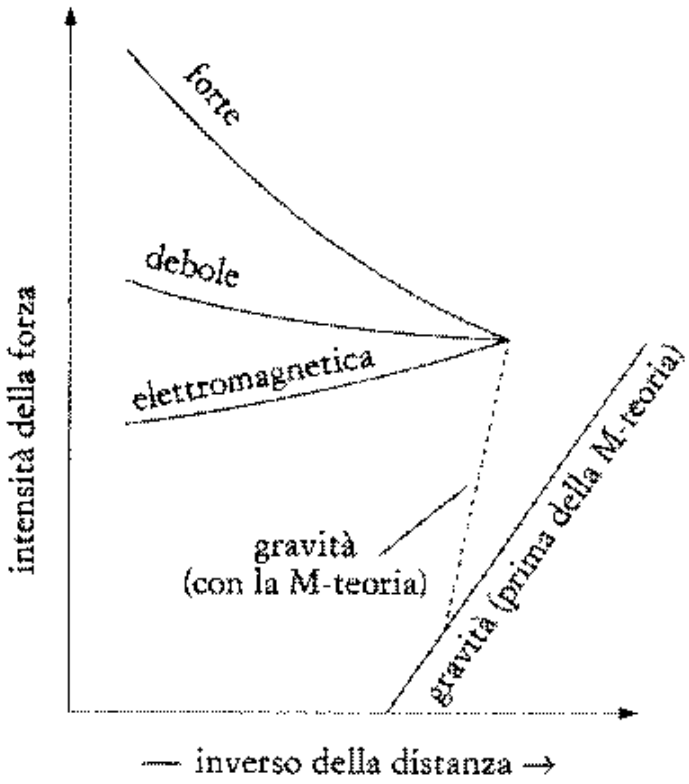

Figura 14.2.
Grazie alla M-teoria le intensità delle quattro forze fondamentali si fondono.

12. Speculazioni cosmologiche e teoria ultima.

La cosmologia ha su di noi una presa emotiva molto forte, perché non pochi hanno l'impressione che capire *come* ebbero inizio le cose sia l'unico modo a nostra disposizione per avvicinarci a capire *perché* ebbero inizio. Ciò non vuol dire affatto che la scienza moderna stabilisca un qualche collegamento tra il *come* e il *perché;* non solo non è cosí, ma può anche darsi che tale questione resterà per sempre al di là degli orizzonti scientifici. Tuttavia, lo studio della cosmologia mantiene la promessa di fornirci la descrizione piú completa dello scenario del perché - la nascita dell'universo -e questo ci permette quantomeno di situare i nostri interrogativi in uno schema scientificamente non ingenuo. A volte, nell'impossibilità di trovare la risposta, non rimane altro da fare che conoscere meglio la domanda.

Nella ricerca della teoria ultima, queste riflessioni cosí elevate lasciano il posto a considerazioni di carattere piú concreto. Se l'universo ci appare in un certo modo oggi - all'estrema destra della scala temporale della figura 14. 1 - ciò è conseguenza delle leggi fondamentali della fisica, ma potrebbe anche dipendere da alcuni aspetti dell'evoluzione cosmologica, all'estrema sinistra della scala temporale, che forse nessuna teoria, anche la piú profonda, sarà mai in grado di cogliere.

Non è difficile immaginare il perché di questa asserzione. Riflettete per un attimo a ciò che accade quando lanciate in aria una palla. Le leggi della gravità governano il moto della palla, ma per prevedere dove questa atterrerà tali leggi non bastano. Dovete anche conoscere la velocità della palla quando si stacca dalla vostra mano. In altre parole, è necessario conoscere le *condizioni iniziali* del moto della palla. In modo analogo, alcune caratteristiche dell'universo derivano soltanto da contingenze storiche - il perché si forma qui un pianeta e là invece una stella dipende da una lunga catena di eventi che, almeno in linea di principio, è possibile far risalire a com'era l'universo nei suoi primissimi istanti di vita. Ma è possibile che caratteristiche ancor piú fondamentali forse addirittura le proprietà delle particelle elementari - abbiano una dipendenza diretta dall'evoluzione storica, la quale è contingente, essendo conseguenza delle condizioni iniziali dell'universo.

In effetti, ci siamo già imbattuti almeno una volta in questa idea: nel corso dell'evoluzione dell'universo primordiale, molto caldo, le dimensioni extra previste dalla teoria delle stringhe hanno continuato a cambiare forma, finché non si sono cristallizzate in un particolare spazio di Calabi-Yau quando la temperatura è divenuta sufficientemente fredda. Ma, proprio come per una palla lanciata in aria, l'esito di questo viaggio attraverso molteplici forme di Calabi-Yau può benissimo dipendere da alcuni dettagli relativi alla partenza. Di conseguenza, attraverso l'influsso che la geometria dello spazio di Calabi-Yau finale esercita sulle masse delle particelle e sulle proprietà delle forze, è possibile che lo stato iniziale dell'universo e la successiva evoluzione cosmologica abbiano avuto un impatto profondo sulla fisica che osserviamo oggi.

Non sappiamo quali fossero le condizioni iniziali dell'universo e nemmeno quali idee, concetti o parole potremmo usare per descriverle. Riteniamo che lo stato iniziale di energia, densità e temperatura infinite che emerge tanto nel modello cosmologico standard quanto in quello inflazionario siano un sintomo del fallimento di queste teorie piuttosto che una descrizione veridica di una situazione fisica reale. La teoria delle stringhe rappresenta, in questo senso, un significativo passo in avanti, perché evita che insorgano questi assurdi infiniti; d'altro canto, nessuno ha la benché minima idea di come sia nato il cosmo. A dire il vero, il livello della nostra ignoranza è ancora piú profondo: non sappiamo se ha senso porsi il problema di determinare le condizioni iniziali, oppure se tale questione rimarrà al di fuori della portata di qualsiasi teoria, come se chiedessimo alla relatività generale di prevedere con quanta forza lanciamo in aria una palla.

Vi sono stati da parte di ricercatori come Hawking e James Hartle -della University of California a Santa Barbara - alcuni coraggiosi tentativi di riportare la questione dei dati iniziali cosmologici nell'ambito della fisica, ma tutti infruttuosi. Nel contesto della M-teoria i nostri modelli cosmologici sono ancora troppo arretrati per poter stabilire se questa sia candidata a essere la Teoria del Tutto, se si meriti davvero questo nome, determinando al suo interno le condizioni iniziali cosmologiche, che sarebbero in tal modo elevate al rango di leggi fisiche. Questo è un problema di primaria importanza per la ricerca dei prossimi anni.

Al di là della questione delle condizioni iniziali del cosmo e al loro impatto sulla successiva evoluzione dell'universo, è stata avanzata di recente l'idea che esistano limiti intrinseci al potere esplicativo di ogni presunta teoria ultima. Nessuno sa se queste speculazioni siano fondate o meno, e certamente si tratta di spunti di ricerca ai margini dei filoni principali della scienza odierna. Comunque sia, hanno il merito di mettere in evidenza - seppure in modo provocatorio - un ostacolo nel quale ogni TOE potrebbe scontrarsi.

L'idea di fondo si basa sulla seguente possibilità. Immaginiamo che ciò che di solito si chiama universo sia soltanto una piccola isola facente parte di un enorme arcipelago cosmico costituito da miriadi di isole distinte. Per quanto tutto ciò possa sembrare un po' tirato per i capelli (e forse lo è), Andrei Linde ha suggerito un meccanismo concreto che potrebbe dare origine a un universo di questo tipo. Linde ha scoperto che la violenta esplosione inflazionaria potrebbe non essere un evento unico. Al contrario, le condizioni per l'espansione inflazionaria - ipotizza Linde - si sarebbero presentate ripetute volte in regioni isolate sparpagliate attraverso il cosmo; ciascuna di queste regioni si sarebbe quindi evoluta in un universo distinto. E in tutti questi universi il processo va avanti: nuovi universi scaturiscono da quelli vecchi, generando cosí una rete interminabile di mondi in espansione. La terminologia non è forse delle piú eleganti, ma seguiremo la moda chiamando multiverso questa estensione della nozione di universo; ogni componente del multiverso è un «universo».

L'osservazione cruciale è a questo punto la seguente. Nel capitolo VII abbiamo osservato che tutti gli indizi a nostra disposizione ci suggeriscono che nell'universo che conosciamo esiste una sola fisica, coerente e uniforme. Ma questo potrebbe essere del tutto inessenziale per quanto riguarda le proprietà fisiche degli altri universi, dato che sono separati dal nostro o se non altro perché la luce non ha avuto il tempo di raggiungerci. Possiamo cosí immaginare che la fisica cambi da un universo all'altro. In certi universi le differenze possono essere molto sottili: la massa dell'elettrone o l'intensità della forza forte, ad esempio, potrebbero essere un decimillesimo piú piccole o piú grandi che nel nostro universo. In altri casi è possibile che la fisica sia radicalmente diversa: il quark up potrebbe pesare dieci volte di piú di quanto pesa nel nostro universo, oppure la forza elettromagnetica potrebbe essere dieci volte piú intensa di quella che misuriamo con i nostri strumenti, e ciò avrebbe enormi conseguenze sulle stelle e sulla vita cosí come la conosciamo (si vedano le osservazioni del capitolo I). In altri casi ancora le diversità potrebbero essere davvero radicali: particelle elementari e forze completamente differenti da quelle che conosciamo, oppure - come suggerisce la teoria delle stringhe - un numero di dimensioni spaziali estese diverso da tre. Alcuni universi potrebbero avere soltanto una o addirittura zero dimensioni spaziali macroscopiche, mentre altri potrebbero averne otto, nove o perfino dieci. Se diamo libero corso alla fantasia, le stesse leggi di natura potrebbero cambiare profondamente da un universo all'altro: le possibilità sono infinite.

Ecco il punto. Esplorando questo sconfinato dedalo di universi, si scoprirebbe che la maggior parte di essi non presenta condizioni favorevoli alla vita, o quantomeno a niente che abbia la benché minima somiglianza con la vita che ci è familiare. E' chiaro che le cose debbano stare cosí se la fisica cambia in modo drastico: nel Tubuniverso a due dimensioni la vita, quale la conosciamo, non potrebbe esistere. Ma anche cambiamenti piú modesti interferirebbero con i processi di formazione delle stelle, ad esempio, alterando la loro capacità di sintetizzare atomi essenziali alla vita quali il carbonio e l'ossigeno, che sono di solito diffusi attraverso l'universo dalle esplosioni delle supernove. Tenendo conto di questa dipendenza della vita dai dettagli della fisica, se ci domandiamo perché le forze e le particelle hanno quelle particolari caratteristiche che osserviamo, si delinea una possibile risposta: queste proprietà variano enormemente nel multiverso -possono essere diverse, e lo sono, in altri universi - e la peculiarità che contraddistingue la combinazione di forze e particelle del nostro universo è quella di permettere il formarsi della vita. E l'esistenza della vita, della vita intelligente in particolare, è un presupposto necessario per potersi domandare perché il nostro universo ha le proprietà che ha. In altre parole, le cose nel nostro universo sono come sono perché, se fossero diversamente, noi non saremmo qui a osservarlo. Come per i vincitori di una roulette russa di massa, la sorpresa della sopravvivenza è attenuata dalla coscienza che, se non avessero vinto, non avrebbero nemmeno avuto la possibilità di sorprendersi, cosí l'ipotesi del multiverso ha la prerogativa di mitigare la nostra insistenza nel cercare la spiegazione del perché l'universo in cui viviamo appare come appare.

Questo ragionamento è una versione di quell'idea, con una lunga storia alle spalle, nota sotto il nome di principio antropico. Nella prospettiva in cui l'abbiamo presentato, è una concezione diametralmente opposta al sogno di una teoria rigida, unificata, con un potere di previsione senza limiti, secondo la quale le cose sono come sono perché l'universo non potrebbe essere differente. Invece di proporre un modello di armonia e di inflessibile eleganza, il multiverso e il principio antropico ci prospettano una inesauribile varietà di universi. Sarà difficile, se non impossibile, stabilire se questo quadro teorico corrisponda a verità. Anche se esistessero altri universi, è presumibile che ci rimarranno per sempre sconosciuti. Ma il concetto di multiverso, ingrandendo il « cielo stellato sopra di noi» - in proporzioni tali che la consapevolezza che esistano altre galassie oltre alla Via Lattea non è nulla al confronto - ci mette in guardia dal rischio di pretendere troppo da una TOE.

Dovremmo richiedere che la nostra teoria ultima dia una coerente descrizione quantistica di tutte le forze e di tutta la materia e che fornisca un convincente modello cosmologico all'interno del nostro universo. Tuttavia, se la concezione

del multiverso è corretta - un «se» molto pesante - può darsi che sia pretendere troppo dalla nostra teoria aspettarsi che essa spieghi anche le specifiche proprietà delle masse delle particelle, delle cariche di gauge e delle forze.

Ma anche la conclusione che dall'ipotesi del multiverso consegua immancabilmente una limitazione del potere predittivo delle nostre teorie non è inevitabile. In effetti, se per concepire l'idea di multiverso abbiamo dato libero corso alla fantasia, possiamo ora sbrigliare la nostra immaginazione teorica e supporre che sia possibile domare in qualche modo il disordine del multiverso. Adottando una linea di pensiero relativamente conservatrice, potremmo ipotizzare di riuscire a generalizzare la nostra teoria ultima anche al multiverso e di ottenere cosí una « teoria ultima estesa», in grado di spiegare come e perché i valori dei parametri fondamentali si distribuiscano nella moltitudine di universi che lo costituiscono.

Una proposta ben piú innovativa è stata avanzata da Lee Smolin, un fisico della Penn State University. Traendo ispirazione dalle somiglianze tra le condizioni del big bang e quelle al centro dei buchi neri - caratterizzate entrambe da un'enorme densità di materia - Smolin ha ipotizzato che ogni buco nero sia il seme da cui nasce un nuovo universo attraverso un'esplosione simile al big bang; l'orizzonte degli eventi del buco nero terrebbe per sempre nascosti ai nostri occhi questi nuovi universi. Oltre a proporre un altro meccanismo mediante il quale si potrebbe generare un multiverso, Smolin ha introdotto una nuova idea una versione cosmica della mutazione genetica - che elimina le limitazioni scientifiche associate al principio antropico.[9] Le idee di Lee Smolin sono discusse nel suo libro, *The Life of the Cosmos,* Oxford University Press, New York 1997 [trad. it. *La vita del cosmo,* Einaudi, Torino 19981.

Supponiamo che, quando un universo scaturisce dal nucleo di un buco nero le sue caratteristiche fisiche - quali le masse delle particelle e le intensità delle forze fondamentali - siano prossime ma non identiche a quelle dell'universo che lo ha generato. Dato che i buchi neri hanno origine dal collasso di stelle e che i processi di formazione stellare dipendono dai valori precisi delle masse delle particelle e delle intensità delle forze, la prolificità di un universo - cioè quanto numerosa è la progenie dei suoi buchi neri - dipende in maniera critica da tali parametri. Piccole variazioni di questi parametri potranno dar luogo a universi figli nei quali vi sarà una maggiore produzione di buchi neri e che saranno dunque piú prolifici degli universi che li hanno generati.[10] Nel contesto della teoria delle stringhe, ad esempio, questa evoluzione potrebbe essere prodotta da piccole deformazioni dello spazio di Calabi-Yau di compattificazione. Dai nostri risultati sulle transizioni attraverso singolarità coniche, sappiamo che una successione sufficientemente lunga di tali deformazioni può modificare ogni spazio di CalabiYau in qualunque altro- in tal modo il multiverso potrebbe saggiare l'efficienza riproduttiva di tutti gli universi fondati sulle stringhe. Dopo un numero sufficiente di «generazioni» successive, ci aspettiamo, in base all'ipotesi di Smolin, che l'universo tipico avrà una componente di Calabi-Yau che ottimizza la sua prolificità.

Dopo molte «generazioni», i discendenti di quegli universi che hanno ottimizzato la produzione di buchi neri costituiranno la stragrande maggioranza dei costituenti del multiverso. In tal modo, anziché invocare il principio antropico, l'ipotesi di Smolin fornisce un meccanismo dinamico che, in media, avvicina i parametri di ogni generazione successiva a quei particolari valori delle masse delle particelle e delle intensità delle forze che sono ottimali per la formazione di buchi neri.

Questa impostazione ci offre un metodo per spiegare i parametri fondamentali anche nel contesto del multiverso. Se Smolin è nel giusto e se il nostro universo è un costituente tipico di un multiverso maturo (due « se» cui si potrebbero muovere obiezioni da molti punti di vista), i valori delle particelle e delle forze che misuriamo dovrebbero essere quelli ottimali per la produzione di buchi neri. In altri termini, per ogni variazione seppur minima di questi valori i buchi neri si dovrebbero formare con piú difficoltà. I fisici sono già al lavoro per verificare questa previsione, la cui validità è ancora controversa. Ma anche se la proposta di Smolin fosse di per sé sbagliata, ci suggerisce un nuovo punto di vista a proposito della teoria ultima. A prima vista può infatti sembrare che ogni possibile teoria ultima non sia abbastanza rigida: descrive una moltitudine di universi, la maggior parte dei quali non ha niente a che spartire con il nostro, e il fatto che tutti questi universi siano fisicamente realizzati sembra porre limitazioni invalicabili al nostro potere di previsione. Ciò nonostante, come dimostra la discussione precedente, rimane ancora aperta la possibilità di una spiegazione definitiva se, insieme alle leggi, si tiene conto anche delle loro implicazioni a grandissima scala per l'evoluzione cosmica.

E indubbio che le implicazioni cosmologiche della M-teoria (o se si preferisce, della teoria delle stringhe) costituiranno un importante filone di ricerca della fisica del ventunesimo secolo. In mancanza di acceleratori in grado di produrre energie della scala di Planck, saremmo costretti a fare assegnamento sull'acceleratore cosmico del big bang e sfruttare i detriti che ha sparpagliato attraverso l'universo come dati sperimentali. Con una buona dose di fortuna e di perseveranza, potremmo forse riuscire a trovare risposta alle domande fondamentali: come è nato l'universo e perché si evoluto nelle forme che possiamo contemplare nei cieli e sulla terra? Naturalmente, rimane molta strada da percorrere in

territori ancora inesplorati. Ma il fatto che la teoria delle superstringhe permetta di sviluppare una teoria quantistica della gravità ci lascia sperare di possedere gli strumenti teorici adeguati per addentrarci nelle vaste regioni dell'ignoto e forse riuscire a svelare - con non poca fatica - le risposte ad alcuni degli interrogativi piú profondi che gli esseri umani si siano mai posti.

Capitolo quindicesimo
Il futuro

Forse tra qualche secolo, la teoria delle stringhe - o la sua evoluzione all'interno della M-teoria - avrà preso strade cosí diverse dalle attuali da risultare irriconoscibile ai fisici di oggi. Nella nostra continua ricerca della «teoria ultima» potremmo anche accorgerci che la teoria delle stringhe non è che un passo - pur se fondamentale - sul sentiero che porta a una concezione onnicomprensiva del cosmo, una concezione in cui facciamo uso di idee del tutto diverse da quelle incontrate finora. Come ci insegna la storia della scienza, ogni volta che pensiamo di essere arrivati a capire tutto quanto, la natura ha in serbo una clamorosa sorpresa che ci obbliga a cambiare anche drasticamente le nostre ipotesi sul funzionamento del mondo. Comunque sia, atteggiandoci un po' a spacconi, possiamo pensare (come altri hanno fatto ingenuamente prima di noi) di stare vivendo in un periodo straordinario della storia dell'umanità, in cui la ricerca delle leggi piú fondamentali dell'universo sta finalmente per concludersi. Dice Edward Witten:

Penso che siamo talmente vicini alla forma definitiva della teoria delle stringhe che mi immagino - nei momenti di piú sfrenato ottimismo - che un bel giorno ci cascherà addosso dal cielo e ci atterrerà in grembo. Piú realisticamente, penso che stiamo architettando una teoria molto piú profonda di quanto non sia mai capitato, e che piú avanti nel ventunesimo secolo, quando sarò troppo vecchio per portare idee interessanti alla causa, toccherà ai fisici piú giovani stabilire se siamo arrivati davvero alla teoria finale.[1] Conversazione con Edward Witten, 4 marzo 1998.

Anche se stiamo ancora riavendoci dallo shock della seconda rivoluzione delle superstringhe, cercando di assimilare la grande ricchezza di nuove idee che ci ha portato, molti concordano nell'affermare che ci vorrà con ogni probabilità un terzo, se non un quarto sconvolgimento teoretico di uguale portata prima che la nostra teoria si riveli in tutta la sua potenza e nel suo possibile ruolo di teoria finale. Come abbiamo visto, ci ha già fornito un quadro assai innovativo del funzionamento dell'universo, ma non mancano ostacoli e passi falsi, che catalizzeranno senza dubbio l'attenzione dei fisici del ventunesimo secolo. E cosí, in quest'ultimo capitolo, non potremo mettere la parola fine a una storia che racconta la ricerca delle leggi piú fondamentali dell'universo, proprio perché la ricerca continua. Gettiamo invece uno sguardo al futuro della teoria delle stringhe e occupiamoci dei cinque problemi fondamentali con i quali i fisici si dovranno confrontare per arrivare alla teoria finale.

1. Qual è il principio fondamentale su cui si basa la teoria delle stringhe?

La storia degli ultimi cento anni ci ha insegnato un fatto generale: le leggi della fisica a noi note sono sempre associate a un qualche principio di simmetria. La relatività ristretta si basa sulla simmetria prevista dal principio di relatività, cioè la simmetria tra tutti gli osservatori in moto uniforme. La relatività generale estende questa simmetria, tramite il principio di equivalenza, a tutti i possibili punti di vista, quale che sia il loro stato di moto. E le forze elettromagnetiche e quelle nucleari si basano su altri, piú astratti principi di simmetria, quelli di gauge.

Come abbiamo visto, i fisici tendono a mettere i principi di simmetria su una sorta di piedistallo, elevandoli a rango di spiegazioni. La gravità sembra esistere *per far sí che il* principio di equivalenza sia valido, cioè per rendere simmetrici tutti gli osservatori; allo stesso modo, le forze non gravitazionali sembrano fatte apposta per permettere alla natura di rispettare le corrispondenti simmetrie di gauge. Ovviamente questo non fa che spostare la questione dal perché esista la

forza al perché esista la simmetria; ma ci sembra comunque di aver fatto un certo progresso, soprattutto quando la simmetria in questione sembra essere cosí «naturale». Perché, ad esempio, dovremmo trattare il punto di vista di un certo osservatore privilegiato in modo diverso dagli altri? E assai piú naturale ammettere il principio di equivalenza (e quindi la forza di gravità), che assegna a ciascun osservatore la stessa dignità. Come abbiamo visto nel capitolo V, la stessa cosa si può dire per la simmetria di gauge e per le forze non gravitazionali, anche se ci vuole un po' di matematica in piú per capirlo.

La teoria delle stringhe ci porta un gradino oltre sulla scala esplicativa, perché comprende in modo intrinseco tutti questi principi di simmetria piú un altro ancora, la supersimmetria. Se la storia fosse stata diversa, e la teoria delle stringhe fosse stata scoperta molto tempo fa, probabilmente ci saremmo accorti di queste simmetrie a partire dalla teoria. Ricorderete infatti che il principio di equivalenza e la simmetria di gauge, che pure ci danno qualche informazione sull'esistenza delle forze della natura, *derivano* dalla teoria delle stringhe: la loro importanza non viene meno, ma entrano comunque a far parte di una struttura esplicativa piú ampia.

Tutto ciò ci porta a una domanda fondamentale: anche la teoria delle stringhe è conseguenza di un qualche principio di piú vasta portata - si tratti o meno di un principio di simmetria - proprio come il principio di equivalenza e le simmetrie di gauge portano inesorabilmente all'esistenza delle quattro forze note? Fino ad oggi nessuno è riuscito ad apportare il benché minimo contributo alla soluzione di questo problema. E' un punto assai importante; provate ad immaginare Einstein alle prese con la relatività generale senza il «pensiero felice» del *1907,* che lo portò a formulare il principio di equivalenza: forse ci sarebbe arrivato lo stesso, ma certo con molte maggiori difficoltà. Il principio di equivalenza è una struttura concettuale chiara, semplice e universale, che permette di analizzare con successo la forza gravitazionale. Nel capitolo III, quando abbiamo parlato di relatività generale, ci siamo basati in modo essenziale su questo principio; e il suo ruolo nel formalismo matematico della teoria è ancora piú importante.

Oggi chi studia le stringhe è in una posizione analoga a quella di Einstein senza il principio di equivalenza. Fin dalla prima intuizione di Veneziano, nel *1968,* la teoria delle stringhe è stata assemblata un pezzo alla volta, scoperta dopo scoperta, rivoluzione dopo rivoluzione. Ma manca ancora un principio generale che organizzi e comprenda queste singole parti, facendole rientrare in una teoria sistematica, dove l'esistenza di ogni singolo componente risulta niente meno che inevitabile. La scoperta di un tale principio sarebbe di grande importanza; certo, non c'è nessuna garanzia del fatto che questo esista davvero, ma la storia della fisica nell'ultimo secolo ci incoraggia a sperare. Mentre stiamo per entrare in una nuova fase della teoria delle stringhe, la scoperta di questo «principio di ineluttabilità» diventa uno degli scopi principali della ricerca.[2] C'è chi vede un abbozzo di questo concetto nel cosiddetto *principio olografico (holographic principle),* un principio enunciato da Leonard Susskind e dal famoso fisico olandese Gerard 't Hooft. Come gli ologrammi sono in grado di riprodurre un'immagine tridimensionale partendo da una particolare pellicola bidimensionale, cosí tutti i fenomeni fisici osservati potrebbero essere studiati grazie ad equazioni definite in un mondo con *meno* dimensioni. Anche se può sembrare un'idea assurda quanto quella di fare un ritratto partendo da un'ombra, cerchiamo di capirne qualcosa di piú ripensando all'entropia di un buco nero, di cui abbiamo parlato nel capitolo XIII (e che è una parte dei motivi che spinsero Susskind e 't Hooft a introdurre il principio). Ricorderete che l'entropia è determinata dall'area della *superficie* dell'orizzonte degli eventi di un buco nero, e non dal volume della regione di spazio che l'orizzonte stesso racchiude. Quindi il «disordine» di un buco nero, e di conseguenza l'informazione che può portare, è scritto nel dato *bidimensionale* costituito dall'area. L'orizzonte degli eventi agisce quasi come un ologramma, catturando in sole due dimensioni tutta l'informazione contenuta nella regione tridimensionale al suo interno. Susskind e 't Hooft hanno esteso questo concetto all'intero universo, sostenendo che tutto ciò che accade al suo «interno» non è che un riflesso di dati ed equazioni definiti su una remota superficie di contorno. I recenti studi del fisico Juan Maldacena di Harvard, insieme con quelli di Witten e di Steven Gubser, Igor Klebanov e Alexander Polyakov, tutti di Princeton, mostrano che, almeno in alcuni ca*si, la teoria delle siringhe incorpora il principio olografico. I* dettagli sono al momento oggetto di studi approfonditi, ma sembra che le leggi di un universo governato dalla teoria delle stringhe siano equivalenti a quelle ristrette a una superficie di confine dell'universo stesso, superficie le cui dimensioni sono necessariamente inferiori a quelle dell'«interno». C'è addirittura chi pensa che il principio olografico, se compreso appieno, ci porterà alla terza rivoluzione delle superstringhe.

2. Cosa sono in realtà lo spazio e il tempo ? Possiamo farne a meno ?

Spesso nel corso del libro abbiamo fatto libero uso dei concetti di spazio e di tempo. Nel capitolo II abbiamo visto

Einstein scoprire che spazio e tempo sono connessi in modo inestricabile, grazie al fatto inaspettato che il moto di un corpo nello spazio influenza anche il suo passaggio nel tempo. Nel capitolo in abbiamo approfondito la questione grazie alla relatività generale, che mostra come la forma precisa dello spaziotempo si faccia mediatrice della forza gravitazionale da un punto all'altro del cosmo. Le violente fluttuazioni quantistiche a livello microscopico, viste nei capitoli IV e V, alterano la trama dello spaziotempo e rendono necessaria un'altra teoria, che abbiamo visto essere la teoria delle stringhe. E in tutti i capitoli successivi abbiamo mostrato come quest'ultima asserisca che lo spaziotempo è assai diverso da come pensiamo, perché ha molte piú dimensioni di quelle che saltano all'occhio, alcune delle quali arrotolate a formare spazi minuscoli ma complicati, che possono subire straordinarie trasformazioni nelle quali si strappano, si forano e si rammendano da soli.

Attraverso rappresentazioni grafiche come quelle nelle figure 3.4, 3.6 e 8.10, abbiamo cercato di illustrare queste idee raffigurando lo spaziotempo come una sorta di tessuto materiale che costituisce l'universo. Sono immagini molto esplicative, spesso utilizzate dagli stessi ricercatori come supporto visuale per il loro lavoro teorico. Anche se questi tipi di modelli possono farci gradualmente arrivare a capire meglio la faccenda, non possiamo non domandarci cosa intendiamo *davvero* quando parliamo di spaziotempo.

E' una questione assai profonda, che è stata dibattuta in qualche forma alternativa per secoli. Per Newton lo spazio ed il tempo erano gli eterni e immutabili ingredienti della fattura del cosmo, strutture primitive che non era necessario spiegare o mettere in dubbio: «Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata [...] Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale e immobile».[3] Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica,* 1687 [trad. it. *Principi matematici della filosofia naturale,* in *Newton,* tomo I, UTET, Torino 19651.

Altri dotti dell'epoca, Leibniz su tutti, manifestarono rumorosamente il loro dissenso: spazio e tempo, per loro, non erano che «artifici contabili» utili a riassumere in modo efficiente le relazioni tra gli oggetti e gli eventi dell'universo. Parlare di posizione di un corpo nel cosmo ha senso solo se lo paragoniamo a un altro: spazio e tempo non sono che il vocabolario con cui scriviamo questi paragoni. Anche se la posizione newtoniana, forte del successo delle sue leggi del moto, tenne campo per piú di due secoli, le idee di Leibniz, riprese nell'Ottocento dal fisico austriaco Ernst Mach, sembrano molto piú vicine al nostro modo di pensare. Come abbiamo visto, la relatività einsteiniana ha spazzato via l'idea di spazio e tempo assoluti e universali. Possiamo però chiederci se il modello geometrico dello spaziotempo, che ha un ruolo cruciale sia nella relatività generale sia nella teoria delle stringhe, non sia anche in questo caso un utile «artificio» per descrivere le relazioni spaziali e temporali tra vari punti dell'universo, o se sia piuttosto qualcosa di *reale,* qualcosa in cui siamo davvero immersi.

Stiamo addentrandoci su strade assai speculative, ma la teoria delle stringhe ha comunque una risposta da suggerire. Il gravitone, il piú piccolo pacchetto di forza gravitazionale, è un particolare modo di vibrazione delle stringhe; cosí come la luce visibile è composta da un numero enorme di fotoni, il campo gravitazionale è formato da un numero altrettanto enorme di gravitoni, cioè da stringhe che vibrano nel modo corrispondente. I campi gravitazionali, a loro volta, sono codificati all'interno della curvatura dello spaziotempo; in questo modo siamo portati a identificare la trama dello spaziotempo con un insieme enorme di stringhe che vibrano tutte nello stesso modo, quello tipico del gravitone. Nel linguaggio della teoria dei campi, questa impressionante sequenza (array) di stringhe ordinate è detta uno stato *coerente.* E' un'immagine quasi poetica - le stringhe che formano i fili della trama dell'universo - ma teniamo presente che il significato preciso di tutto ciò deve ancora essere compreso a fondo.

Comunque sia, dipingere lo spaziotempo in questo modo ci porta naturalmente a formulare una domanda. Un normale pezzo di tessuto è il risultato finale dell'attenta tessitura di un certo numero di fili, che sono i costituenti di base dei prodotti tessili. Esiste allora, in modo analogo, una «materia prima » della trama del cosmo, una configurazione di stringhe che non si sono ancora riunite in quella forma organizzata che riconosciamo come spaziotempo? Si noti che è impreciso parlare di questo stato primigenio come di una massa non organizzata di stringhe, perché nel nostro modo usuale di ragionare ciò presuppone sia la nozione di spazio sia quella di tempo: lo spazio in cui una stringa vibra e la successione di istanti che ci porta a riconoscere i cambiamenti nella sua configurazione. Ma nello stato primigenio, prima che le stringhe si mettano a vibrare in modo coerente, lo spazio *e il tempo non possono* realizzarsi. Persino il nostro linguaggio è troppo rozzo per trattare questa situazione, perché anche il concetto di «prima» perde senso. E come se le singole stringhe fossero scampoli di spaziotempo, che danno luogo alle idee convenzionali di spazio e tempo solo quando si mettono a vibrare in un certo modo coordinato.

Raffigurare mentalmente un simile stato primario di esistenza, privo di ogni struttura, in cui non esistono lo spazio e il tempo come li intendiamo di solito, è un compito al limite delle capacità di quasi tutti noi (sicuramente delle mie). Viene in mente la battuta di Stephen Wright sul fotografo ossessionato dall'idea di fare un primo piano all'orizzonte: anche noi ci scontriamo con il paradigma corrente quando cerchiamo di immaginare un universo che *esiste* ma che in un certo qual modo non porta in sé i concetti di spazio e tempo. Comunque sia, è probabile che dovremo affrontare queste difficoltà speculative e comprenderne le conseguenze prima di aver concluso il lavoro con la teoria delle stringhe. La nostra formulazione attuale della teoria presuppone l'esistenza dello spaziotempo, all'interno del quale le stringhe (e tutti gli altri ingredienti della M-teoria) si muovono e vibrano. Questa ipotesi ci permette di dedurre le proprietà fisiche di un universo dotato di una dimensione temporale, di alcune dimensioni spaziali estese (che di solito si suppongono essere tre) e di altre dimensioni spaziali arrotolate in uno degli spazi ammessi dalle equazioni. Ma queste sono limitazioni al potere della teoria: è come se giudicassimo il talento di un artista sulla base della sua abilità a completare una figura entro margini e con colori stabiliti. Un vero artista aggiungerà senza dubbio un tocco personale a questo compito, ma le limitazioni troppo rigide poste al suo lavoro ci permetteranno di apprezzare solo in minima parte il suo talento. Allo stesso modo, visto che il trionfo della teoria delle stringhe sta nella naturale fusione di meccanica quantistica e gravità, e visto che la gravità è legata a doppio filo allo spaziotempo, non dovremmo imporre alla teoria di operare in una struttura spaziotemporale già definita. Invece, proprio come mettiamo alla prova un vero artista fornendogli solo la tela bianca e i colori, dovremmo lasciare la teoria delle stringhe libera di *crearsi da sé* il proprio scenario, partendo da una configurazione priva di spazio e tempo.

La speranza è che partendo da questa *tabula rasa - forse* in un'epoca precedente al big bang (sempre che sia legittimo usare un'espressione temporale come «precedente», in mancanza di strutture linguistiche adeguate) - la teoria delle stringhe ci mostrerà un universo che si evolve fino a far emergere la struttura di fondo che ci aspettiamo: un insieme di stringhe che vibra in modo coerente e che dà origine alle nozioni convenzionali di spazio e tempo. Se tutto ciò si verificasse, avremmo dimostrato che spazio, tempo e (per associazione) dimensione non sono concetti che entrano nella definizione stessa di universo, bensì nozioni utili per la sua descrizione, che emergono a partire da uno stato primordiale, di base.

Alcune ricerche molto avanzate su certi aspetti della M-teoria, condotte principalmente da Stephen Shenker, Edward Witten, Toni Banks, Willy FischIer, Leonard Susskind e molti altri che non posso ricordare qui, hanno portato a ipotizzare l'esistenza di un qualcosa chiamato *zero-brana. Si* tratta del probabile costituente di base della teoria, un oggetto che si comporta in un certo senso come una particella puntiforme alle grandi scale, ma che ha proprietà del tutto diverse a livello microscopico. La zerobrana potrebbe darci un'idea dell'universo senza spazio e senza tempo. Le ricerche mostrano che, laddove la teoria delle stringhe indica che le nozioni convenzionali di spazio perdono significato sotto la scala di Planck, la zero-brana, pur implicando essenzialmente la stessa cosa, lascia aperta una piccola finestra sulle stranezze che accadono alle piccolissime distanze. Sembra che la geometria tradizionale lasci il posto alla geometria *non commutativa,* un'area della matematica la cui creazione si deve in gran parte ad Alain Connes, del Collège de France.[4] Se conoscete l'algebra lineare, potete farvi un'idea della geometria non commutativa sostituendo le tradizionali coordinate cartesiane, il cui prodotto è commutativo, con matrici, il cui prodotto non è invece commutativo.

In questo nuovo scenario, le nozioni convenzionali di spazio e di distanza tra due punti svaniscono, mostrandoci un paesaggio radicalmente diverso; tuttavia, man mano che ci allontaniamo dalla lunghezza di Planck, vediamo che il concetto tradizionale di spazio torna a esser valido. E' probabile che lo schema proposto dalla geometria non commutativa sia ancora assai distante dallo stato primigenio di cui abbiamo parlato poco sopra; ci fornisce comunque una prima idea di cosa potrebbe accadere in un quadro concettuale piú ampio, che comprende spazio e tempo come prodotti.

Trovare la formulazione matematicamente esatta della teoria delle stringhe senza far ricorso alle nozioni di spazio e tempo è una delle sfide piú importanti per i ricercatori. Riuscire a capire come nasca lo spaziotempo ci porterebbe assai piú vicini a capire quale sia la *vera* forma geometrica che salta fuori dalla teoria.

3. Ci sarà una riformulazione della meccanica quantistica?

La meccanica quantistica descrive il funzionamento dell'universo con una precisione sperimentale straordinaria. Ciò nonostante, negli ultimi cinquant'anni la strategia dei fisici è sempre stata quella di mettere, strutturalmente, la meccanica

quantistica in una posizione un po' defilata. In pratica, nella formulazione di una nuova teoria si parte sempre dal linguaggio classico, che ignora le probabilità, le funzioni d'onda e cosí via -un linguaggio che sarebbe perfettamente comprensibile ai contemporanei di Maxwell, e forse anche a quelli di Newton - e in un secondo tempo si sovrappongono le idee quantistiche alla struttura classica. Non c'è di che sorprendersi, visto che questo modo di procedere riflette l'esperienza quotidiana. A una prima occhiata, l'universo pare governato da leggi puramente classiche, in cui una particella ha una posizione e una velocità ben definite in ogni istante del tempo. Solo dopo accurate misurazioni microscopiche ci si accorge che le ipotesi classiche non sono piú valide. La storia delle nostre scoperte parte dalla fisica newtoniana e arriva attraverso successive modifiche alla meccanica quantistica, un processo che in qualche modo è rievocato nella pratica della ricerca odierna.

Questo è certamente successo con la teoria delle stringhe. Il suo formalismo matematico parte da equazioni che descrivono il moto di una stringa infinitamente sottile secondo la concezione *classica,* equazioni che in gran parte potrebbero essere state scritte da Newton tre secoli fa. In un secondo tempo, queste relazioni vengono *quantizzate:* cioè, con una tecnica che si è affinata nel corso degli ultimi cinquant'anni, vengono tradotte in un linguaggio quantistico, con le sue probabilità, funzioni d'onda, fluttuazioni e cosí via. Nel capitolo XII abbiamo visto questo procedimento all'opera: i processi a piú loop (vedi figura 12.6) codificano ben precisi concetti quantistici - in questo caso la creazione momentanea di coppie di stringhe virtuali - e il numero dei loop determina la precisione con cui si tiene nota degli effetti quantomeccanici.

Partire da una descrizione di tipo classico per poi inserirvi gli effetti dovuti alla meccanica quantistica è una strategia che si è rivelata vincente per molti anni; ad esempio, il modello standard della fisica delle particelle è stato sviluppato in questo modo. Ma è possibile, se non probabile, come molti sospettano, che questo metodo sia troppo tradizionale per teorie cosí generali come le superstringhe e la M-teoria. Una volta convinti del fatto che l'universo si basa su principi quantistici, le teorie da noi proposte dovrebbero tenerne conto fin dall'inizio. Finora ce la siamo cavata con successo perché non ci siamo mai spinti oltre un certo limite; ma la M-teoria è troppo profonda per la nostra rozza strategia, che potrebbe dunque essere giunta alla fine.

Ne possiamo avere una riprova ripensando a ciò che abbiamo detto a proposito della seconda rivoluzione delle superstringhe (si veda ad esempio la figura 12.11). Come abbiamo visto nel capitolo XII, l'unificazione delle cinque versioni della teoria delle stringhe si basa sul fatto che i processi descritti da ciascuna di queste possono essere reinterpretati in modo duale in ognuna delle altre. La riscrittura di certe leggi sembra a un primo sguardo non avere niente a che fare con la formulazione originale, ma questo è il bello della dualità, che ci permette di descrivere uno stesso fenomeno fisico in molti modi diversi. I risultati sono spesso notevoli, ma non abbiamo ancora parlato di quella che è forse la loro caratteristica piú importante.

La dualità spesso traduce un processo descritto in una delle teorie come *fortemente* dipendente dalla meccanica quantistica (ad esempio, interazioni tra stringhe che non avrebbero luogo in presenza delle sole leggi classiche) in un processo che ne dipende *debolmente* dal punto di vista di un'altra teoria (ad esempio, un fenomeno i cui aspetti quantitativi precisi sono influenzati dalle proprietà quantistiche, ma la cui forma qualitativa è identica a quella che avrebbe in un universo classico). Ciò significa che la meccanica quantistica è legata in modo indissolubile alle simmetrie di dualità della teoria delle stringhe e della M-teoria: queste ultime sono simmetrie *intrinsecamente quantomeccaniche,* perché una delle formulazioni duali non può prescindere dagli effetti quantistici. Questo mostra con chiarezza che la formulazione della M-teoria - che deve per forza tener conto delle nuove simmetrie di dualità - non può partire da una versione classica per poi essere quantizzata, come nella strategia consueta; sembra proprio che la M-teoria debba rompere con la tradizione e saltar fuori in forma già completamente quantomeccanica.

Al momento, nessuno è in grado di farlo. Molti ricercatori, però, pensano che la vera svolta si avrà solo cambiando il modo in cui utilizziamo i principi quantistici per spiegare il funzionamento dell'universo. Secondo Cumrun Vafa, ad esempio, « una riformulazione della meccanica quantistica, che risolverà molti dei suoi rompicapi, è praticamente dietro l'angolo. Penso che molti scienziati siano d'accordo sul fatto che le nuove scoperte sulle dualità portino a una nuova struttura di tipo geometrico, in cui spazio, tempo e proprietà quantistiche siano indissolubilmente legate». [5]

[5] Conversazione con Curmun Vafa, 12 gennaio 1998.

Edward Witten, dal canto suo, pensa che «la concezione della meccanica quantistica stia per cambiare allo stesso modo in cui la concezione della gravità cambiò dopo la scoperta del principio di equivalenza. Siamo molto lontani

dall'essere arrivati alla soluzione, ma credo che in futuro i nostri tempi saranno ricordati come l'era in cui il ripensamento ebbe inizio».[6] Conversazione con Edward Witten, 11 maggio 1998.

Con un certo cauto ottimismo, possiamo pensare che una riformulazione dei principi della meccanica quantistica all'interno della teoria delle stringhe porterà a scoprire un formalismo piú potente, capace di fornire risposte alle nostre domande sull'origine dell'universo e sull'esistenza di spazio e tempo -cioè capace di avvicinarci a rispondere alla vecchia domanda di Leibniz: perché il mondo esiste, perché c'è qualcosa e non il nulla?

4. La teoria delle stringhe può essere verificata sperimentalmente?

Tra le varie caratteristiche della teoria delle stringhe che abbiamo visto in questo libro, tre mi sembrano le piú importanti da ricordare. In primo luogo, la teoria comprende in sé gravità e meccanica quantistica, i due ingredienti fondamentali nei meccanismi che regolano il funzionamento dell'universo, che ogni teoria unificata che si rispetti deve saper incorporare. Secondariamente, dalla teoria delle stringhe si deducono in modo naturale alcuni concetti e fenomeni fondamentali, molti dei quali sono stati confermati sperimentalmente: lo spin, la struttura delle particelle elementari, la simmetria di gauge, il principio di equivalenza, la rottura della simmetria, la supersimmetria ed altro ancora. Infine - al contrario del modello standard che ne ha ben 19 - la teoria delle stringhe non prevede alcun parametro libero, cioè nessun parametro che possa essere modificato in accordo con i dati sperimentali. In linea di principio, tutte le asserzioni dedotte dalla teoria dovrebbero essere definitive e fornire un test inequivocabile sulla sua verità o falsità.

La strada dalla linea di principio alla pratica è irta di difficoltà. Nel capitolo IX abbiamo visto alcuni degli ostacoli piú tecnici che ci si parano innanzi, come ad esempio la vera forma delle dimensioni compattificate; e nei capitoli XII e XIII abbiamo posto questi e altri impedimenti in un'ottica piú vasta, cioè nell'ambito della ricerca di una teoria piú completa, che porta naturalmente alla M-teoria. Non c'è dubbio che arrivare a capire davvero la teoria delle stringhe, ovvero la M-teoria, richiederà tanto lavoro e grande inventiva.

Ad ogni passo di questo cammino, i fisici hanno cercato e continueranno a cercare qualche conseguenza osservabile della teoria. Non dobbiamo perdere di vista le possibilità anche piú remote, che abbiamo esaminato nel capitolo IX; e inoltre, man mano che le nostre conoscenze si raffinano, salteranno fuori senz'altro altre caratteristiche della teoria dotate di conseguenze osservabili. anche indirettamente.

Comunque, un punto di svolta per la conferma sperimentale della teoria delle stringhe sarebbe la scoperta dei partner supersimmetrici, come abbiamo visto nel capitolo IX. Ricordiamo che la supersimmetria è stata introdotta grazie alle ricerche interne alla teoria delle stringhe, di cui costituisce parte integrante. La sua conferma sperimentale sarebbe una prova convincente, anche se indiziaria, della verità della teoria. Ma l'eventuale scoperta dei partner supersimmetrici non ci porterebbe solo a stabilire se la supersimmetria è davvero una caratteristica importante dell'universo; le masse e le cariche delle nuove particelle ci rivelerebbero molti dettagli su *come* la supersimmetria si manifesta nelle leggi di natura. Verificare se tutte queste proprietà siano compatibili con la teoria delle stringhe sarebbe la nuova sfida da affrontare. Potremmo essere anche piú ottimisti e sperare che nei prossimi dieci anni - ancor prima che il Large Hadron Collider a Ginevra diventi operativo - la teoria avrà fatto progressi tali da fornire previsioni dettagliate sulle proprietà dei partner supersimmetrici, prima che ci si provi a scoprirli. La loro conferma sarebbe un fatto epocale nella storia della scienza.

5. Ci sono limiti alla nostra capacità di spiegazione?

Riuscire a spiegare «tutto quanto», anche nel senso piú ristretto di arrivare a capire ogni aspetto delle forze e delle particelle elementari che costituiscono l'universo, è senz'altro una delle imprese piú ardite che la scienza abbia mai tentato. E per la prima volta abbiamo per le mani una teoria, quella delle superstringhe, che sembra essere abbastanza generale da raccogliere la sfida. Ma riusciremo mai a concretizzare le sue promesse e calcolare, ad esempio, a partire da principi generali le masse dei quark o l'intensità relativa della forza elettromagnetica, e gli altri valori numerici che dettano il funzionamento dell'universo? Anche qui dovremo superare numerosi ostacoli teorici prima di giungere alla meta, il piú grosso dei quali, al momento, è la mancanza di una formulazione pienamente non perturbativa della teoria delle stringhe (ovvero della M-teoria).

Ma è possibile che anche in presenza di una versione chiara e completa della teoria, inquadrata in una nuova, piú trasparente formulazione della meccanica quantistica, i nostri tentativi di calcolare esattamente masse e forze siano destinati a fallire? E' possibile che le misure sperimentali si rivelino comunque insostituibili? E infine, il nostro insuccesso non potrebbe essere dovuto non tanto al fatto che la teoria non è corretta, quanto al fatto che *non esiste una spiegazione* teorica di queste proprietà osservabili?

A tutte queste domande si può rispondere con un sí. Come disse Einstein tempo fa, « la cosa piú incomprensibile dell'universo è che è comprensibile».[7] Citato in Banesh Hoffman e Helen Dukas, *Albert Einstein, Creator and Rebel,* Viking, New York 1972, P. 18

In un'epoca di progressi rapidi e sconvolgenti come l'attuale, non ci meravigliamo piú di fronte alla nostra capacità di spiegare il funzionamento del cosmo. Ma forse esiste un limite intrinseco a questa capacità. Forse dobbiamo accettare il fatto che, anche dopo aver raggiunto il livello di comprensione piú generale che la scienza possa offrire, esisteranno comunque dei fatti inesplicabili: fatti dovuti al caso, alle coincidenze, alla volontà divina o quant'altro. Il successo del metodo scientifico nel passato ci incoraggia a pensare che, prima o poi - e dopo molti tentativi -, saremo in grado di svelare i misteri della natura. Ma arrivare al limite estremo della conoscenza - non un limite tecnologico o teorico di tipo momentaneo - sarebbe un evento unico nel suo genere, a cui l'esperienza passata non ci ha preparato.

Anche se si tratta di una questione di grande importanza per la nostra ricerca della teoria ultima, non siamo in grado di risolverla; anzi, forse il dilemma circa i limiti della conoscenza scientifica non potrà mai essere chiarificato. Abbiamo visto, ad esempio, che anche un'idea del tutto speculativa come quella del multiverso, che sembrerebbe porre seri ostacoli alle nostre spiegazioni, può essere in qualche modo addomesticata grazie a teorie egualmente speculative, in grado in linea di principio di far rientrare tutto all'interno del discorso scientifico.

Da queste considerazioni spicca l'importanza della cosmologia per tutto ciò che riguarda la teoria ultima. Abbiamo visto che l'applicazione delle superstringhe alla cosmologia è un fatto recente, anche secondo i criteri di valutazione della giovane teoria delle stringhe. Sarà senz'altro un'area di ricerca molto importante nei prossimi anni, ed è probabile che vi si registreranno i progressi piú significativi. Man mano che procediamo nei meandri della M-teoria, siamo in grado di scoprire nuove conseguenze cosmologiche di questa autorevole candidata al titolo di teoria unificata. Certo, è sempre possibile che un giorno le nostre ricerche ci porteranno a concludere che esiste, dopo tutto, un limite al potere esplicativo della scienza. Ma è anche possibile l'esatto opposto: l'ingresso in una nuova era, in cui saremo in grado di arrivare a una teoria generale sul funzionamento dell'universo.

6. Verso le stelle.

Anche se la tecnologia ci vincola materialmente alla superficie terrestre e alle sue immediate vicinanze, siamo riusciti, grazie al potere del pensiero e della pratica sperimentale, a raggiungere le piú remote profondità dello spazio. Soprattutto nell'ultimo secolo, grazie agli sforzi congiunti di molti scienziati, siamo riusciti a scoprire i segreti piú nascosti della natura. E queste meraviglie, una volta svelate, ci hanno aperto lo sguardo su un mondo che pensavamo di conoscere, ma il cui vero splendore non potevamo neppure immaginare. Una misura dell'importanza di una teoria fisica è la sua capacità di sconvolgere una visione dei fatti naturali che prima sembrava immutabile. Secondo questo criterio, la meccanica quantistica e la relatività sono di inimmaginabile importanza. Funzioni d'onda, probabilità, effetto tunnel, fluttuazioni di energia nel vuoto, unione di spazio e di tempo, buchi neri, big bang: chi avrebbe immaginato che la visione newtoniana, cosí intuitiva e regolare, si sarebbe dimostrata limitata e provinciale, che c'era un nuovo mondo straordinario nascosto sotto la superficie delle cose, cosí come le vediamo tutti i giorni?

Ma anche queste rivoluzioni paradigmatiche non sono che parti di una storia piú generale. Dotati di una solida fede nel fatto che le leggi dell'infinitamente grande e dell'infinitamente piccolo debbano essere riunite in un quadro coerente, i fisici si sono messi a caccia della sfuggente teoria unificata. La ricerca non è ancora finita, ma grazie alle superstringhe e alla M-teoria abbiamo trovato un modello in cui la meccanica quantistica, la relatività generale e le forze non gravitazionali sembrano fondersi. Le sfide che questa nuova teoria pone alla nostra visione consolidata del mondo sono gigantesche: stringhe, anelli e corpuscoli che oscillano, e che grazie a particolari vibrazioni meticolosamente eseguite creano un universo in cui ci sono dimensioni nascoste, arrotolate in spazi capaci di deformarsi, strapparsi e poi autoricucirsi. Chi

avrebbe mai pensato che l'unificazione di meccanica quantistica e relatività generale avrebbe portato a una simile rivoluzione nelle nostre concezioni?

Non c'è dubbio che ci aspettano sorprese ancora piú grosse nel corso della ricerca di una teoria completa e matematicamente trattabile. La M-teoria ci ha già fatto intravedere strani mondi che fanno capolino dietro alla lunghezza di Planck, mondi in cui forse non esistono lo spazio e il tempo. All'estremo opposto ci è balenata l'idea che il nostro universo non sia che una delle innumerevoli bolle scoppiettanti sulla superficie di un immenso oceano cosmico, il multiverso. Sono tutte idee ai confini della pura speculazione, ma potrebbero prefigurare un nuovo balzo in avanti.

Mentre teniamo lo sguardo fisso al futuro e ci immaginiamo le meraviglie che l'universo ha in serbo per noi, dovremmo anche fermarci a riflettere sul viaggio che abbiamo intrapreso e sulla strada che abbiamo percorso. La ricerca delle leggi fondamentali del cosmo è un'impresa peculiarmente umana, che ha sfidato le menti e arricchito gli spiriti. Ci possiamo certo identificare nelle parole di Einstein, quando racconta i suoi «anni di affannose ricerche al buio, di intenso desiderio, di alternanza di ottimismo e disperazione, e alla fine di tutto la luce ».[8] Martin J. Klein, recensione a R. W. Clark, *Einstein: The Life and Times,* in «Science», vol. CLXXIV, pp. 1315-16.

Tutti, in qualche modo, cerchiamo la verità, tutti siamo ansiosi di sapere perché siamo qui. Tutti insieme stiamo scalando la montagna delle grandi spiegazioni e ogni generazione, ben salda sulle spalle di quella precedente, cerca coraggiosamente di raggiungere la cima. Non sappiamo dire se i nostri discendenti vedranno mai il mondo da lassù e osserveranno l'immenso, elegante universo con infinita chiarezza. Ma passo dopo passo ci vengono in mente le parole di Jacob Bronowski: « In ogni epoca c'è un punto di svolta, un nuovo modo di vedere e testimoniare la coerenza dell'universo».[9] Jacob Bronowski, *The Ascent of Man,* Little, Brown & Co., Boston 1973, P. 20 [trad. it. *L'ascesa dell'uomo,* Fratelli Fabbri, Milano 19761.

E mentre ci stupiamo della nuova visione del cosmo - del nuovo modo di testimoniare la sua coerenza - stiamo facendo la nostra parte, contribuendo anche noi all'ascesa del genere umano verso le stelle.

Glossario dei termini scientifici

ACCELERATORE DI PARTICELLE Macchina per spingere le particelle elementari a velocità prossime a quella della luce e farle urtare tra loro al fine di esplorare la struttura della materia.

AMPIEZZA In un'onda, la massima altezza di un suo picco o la massima profondità di un suo ventre.

ANTIMATERIA Materia che ha le stesse proprietà gravitazionali della materia ordinaria, ma possiede sia carica elettrica opposta sia *cariche di gauge* opposte.

ANTIPARTICELLA Una particella di antimateria.

ATB Acronimo per After *The Bang, usato* di solito con riferimento al tempo trascorso dopo il big bang.

ATOMO Costituente fondamentale della materia, formato da un nucleo (che comprende protoni e neutroni) e da uno sciame di *elettroni orbitanti*.

BIG BANG Secondo il modello cosmologico correntemente accettato, l'universo iniziò a espandersi circa 15 miliardi di anni fa, da uno stato iniziale di densità ed energia enormi.

BIG CRUNCH Secondo questa ipotesi, l'attuale espansione dell'universo sarebbe destinata in futuro ad arrestarsi e a invertire la propria direzione, cosicché tutto lo spazio e la materia dovrebbero collassare insieme; un big bang alla rovescia.

BOSONE Particella, ossia modo di *vibrazione di* una stringa, il cui numero di spin è intero. I bosoni sono tipicamente *particelle mediatrici.*

BOSONI DI GAUGE DEBOLI Le piú piccole frazioni del campo di forza *debole;* le *particelle mediatrici* della *forza debole; si* chiamano anche bosoni W e bosoni Z.

BRANA *(BRANE)* Ogni oggetto esteso che compare in una teoria di stringa; una 1-brana è una stringa, una 2-brana è una membrana, una 3-brana ha tre dimensionali spaziali e cosí via. In generale, una p-brana ha un numero p di dimensioni spaziali.

BUCHI NERI ESTREMALI *Buchi* neri provvisti della massima quantità possibile di carica per una data massa totale.

BUCO NERO Un corpo il cui enorme campo gravitazionale cattura tutto ciò - anche la luce -che gli giunga abbastanza vicino (che superi, cioè, l'orizzonte degli eventi del buco nero).

BUCO NERO SENZA MASSA (*MASSLESS BLACK HOLE*) Nella teoria *delle stringhe, un* tipo particolare di *buco nero, originariamente* dotato di massa, che diventa sempre piú leggero a mano a mano che la porzione Calabi-Yau dello spazio si contrae. Quando questa porzione di spazio si è ridotta a un punto, il buco nero non ha piú massa residua. In questo stato cessa di manifestare alcune proprietà tipiche dei buchi neri, ad esempio non ha piú un orizzonte *degli eventi.*

CAMPO, *CAMPO DI FORZA* Da un punto di vista macroscopico, il mezzo attraverso il quale una forza esercita la sua azione; è descritto da un insieme di numeri, associati a ciascun punto dello spazio, che indicano l'intensità e la direzione della forza in quel punto.

CAMPO ELETTROMAGNETICO Il campo *di forza prodotto* dalla forza elettromagnetica; consiste di linee di forza elettriche e magnetiche passanti per ogni punto dello spazio.

CARICA *(O CARICA DI GAUGE)* Proprietà caratteristica di una particella che determina il modo in cui essa reagisce a una data forza. Per esempio, la carica elettrica di una particella determina il modo in cui essa reagisce alla forza *elettromagnetica.*

CHIRALITA' Proprietà prevista dalla fisica delle particelle elementari che permette di distinguere la sinistra dalla destra, mostrando cosí che l'universo non è del tutto simmetrico rispetto alla riflessione sinistra-destra.

CONTRAZIONE DI LORENTZ Una delle conseguenze previste dalla relatività ristretta: un oggetto in movimento appare piú corto nella direzione del moto.

COSTANTE COSMOLOGICA Termine che si introduce per modificare le equazioni originarie della relatività *generale al* fine di ottenere un universo statico; si può interpretare come la densità di energia costante del vuoto.

COSTANTE DI ACCOPPIAMENTO DI STRINGA Un numero (positivo) che stabilisce quanto è probabile che una data stringa si divida in due stringhe o che due stringhe si uniscano a formarne una sola - essendo questi i processi fondamentali della teoria *delle stringhe. Ogni* teoria delle stringhe ha la sua propria costante di accoppiamento, il cui valore dovrebbe essere determinato da un'equazione; allo stato attuale della conoscenza queste equazioni rimangono ancora abbastanza misteriose e non forniscono dunque alcuna informazione utile. Il fatto che una costante di accoppiamento sia minore di 1 significa che i metodi *perturbativi sono* validi.

COSTANTE DI PLANCK Denotata con il simbolo ~~h~~ (che si legge «h tagliato »), la costante di Planck (razionalizzata) è un parametro fondamentale della *meccanica* quantistica. Determina la dimensione delle unità discrete di energia, massa, spin, ecc., nelle quali è frazionato il mondo microscopico. Il suo valore è uguale a 1,05 X 10-21 grammi x centirnetri2/secondi.

CROMODINAMICA QUANTISTICA *(QCD)* Teoria quantistica di campo della forza forte e dei *quark, compatibile* con la relatività ristretta.

CUNICOLO SPAZIOTEMPORALE *(WORMHOLE)* Una porzione dello spazio a forma di stretto tunnel che collega due regioni dell'universo.

CURVATURA E' la misura di quanto un oggetto, o lo stesso spazio o lo spaziotempo si discosta dalla forma piatta e, di conseguenza, dalle leggi della geometria euclidea.

DETERMINISMO LAPLACIANO Concezione meccanicistica dell'universo, secondo la quale la conoscenza completa dello stato dell'universo a un certo istante è sufficiente a determinare tutti i suoi stati futuri e passati.

DETERMINISMO QUANTISTICO Conseguenza della meccanica quantistica, in base alla quale la conoscenza dello stato quantistico di un sistema fisico a un certo istante determina completamente tutti i suoi stati quantistici futuri e passati. La conoscenza dello stato quantistico, tuttavia, determina soltanto la probabilità che le osservabili fisiche assumeranno certi valori piuttosto che altri.

DILATAZIONE DEL TEMPO Effetto previsto dalla relatività ristretta, in base al quale il tempo scorre piú lentamente per un osservatore in moto.

DIMENSIONE Un asse o una direzione indipendente nello spazio o nello spaziotempo. Lo spazio usuale che ci circonda ha tre dimensioni (destra-sinistra, alto-basso, davanti-dietro), mentre lo spaziotempo usuale ne ha quattro (le tre precedenti e l'asse passato-futuro). La teoria delle *superstringhe richiede* che l'universo debba avere un certo numero di dimensioni spaziali extra che sono compattificate.

DIMENSIONI COMPATTIFICATE Dimensioni spaziali che non hanno un'estensione osservabile; dimensioni spaziali, cioè, che sono arrotolate, schiacciate, o raggomitolate in uno spazio ridottissimo, cosí da sfuggire alla rilevazione diretta (vedi spazio *di* Calabi- Yau).

DIMENSIONI ESTESE Dimensioni spaziali (o dello spaziotempo) direttamente osservabili; sono queste le dimensioni ordinarie, familiari a tutti noi, al contrario delle dimensioni compattificate.

DUALE *(DUALITÀ, SIMMETRIE DI DUALITÀ)* Due o piú teorie sono duali se, pur apparendo completamente diverse, danno origine a identiche conseguenze fisiche.

DUALITÀ ONDA-PARTICELLA *(ONDA-CORPUSCOLO)* Caratteristica fondamentale della meccanica quantistica, in base alla quale gli oggetti manifestano sia proprietà ondulatorie sia proprietà tipiche delle particelle.

DUALITÀ FORTE-DEBOLE *(STRONG-WEAK DUALITY)* Dualità fra una teoria *fortemente ac*coppiata e una teoria *debolmente accoppiata*.

EFFETTO FOTOELETTRICO Emissione di elettroni da parte di una superficie metallica colpita dalla luce.

EFFETTO TUNNEL In questo effetto previsto dalla *meccanica quantistica,* le particelle possono attraversare barriere che sarebbero per loro impenetrabili in accordo alle leggi della fisica classica newtoniana,

ELETTRODINAMICA QUANTISTICA *(QED)* Teoria quantistica di campo della *forza elettromagnetica* e degli *elettroni,* compatibile con la relatività ristretta.

ELETTRONE Particella di carica elettrica negativa; nell'atomo gli elettroni orbitano attorno al nucleo.

ENERGIA DI AVVOLGIMENTO L'energia racchiusa in una stringa avvolta attorno a una *dimensione circolare* dello spazio.

ENERGIA DI PLANCK Pari a circa 1000 chilowattora è l'energia necessaria per sondare sperimentalmente distanze piccolissime dell'ordine della *lunghezza di Planck.* Nella teoria *delle stringhe è* questa l'energia tipica di una stringa in vibrazione.

ENTROPIA Misura del disordine di un sistema fisico; il numero dei modi in cui è possibile risistemare gli ingredienti di un sistema senza che questo appaia modificato nel suo complesso.

ENTROPIA DI BUCO NERO L'entropia propria di un buco *nero.*

EQUAZIONE DI KLEIN-GORDON Un'equazione fondamentale delle teorie *quantistiche di campo.*

EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER Nella *meccanica quantistica,* l'equazione che governa l'evoluzione delle onde di probabilità (vedi *funzione d'onda).*

FAMIGLIA Ciascuno dei tre gruppi in cui sono classificatele particelle « materiali ». Le particelle di una famiglia differiscono da quelle della precedente per essere piú pesanti, avendo però la stessa carica elettrica e le stesse cariche nucleari.

FASE Usato in riferimento alla materia, termine che descrive i suoi stati possibili: fase solida, liquida o gassosa. Piú in generale, designa le possibili descrizioni di un sistema fisico al variare delle caratteristiche dalle quali esso dipende (temperatura, valori della costante di accoppiamento di stringa, forma dello spaziotempo, ecc.)

FERMIONE Particella, ossia modo di vibrazione di una stringa, il cui numero di spin è uguale alla metà di un intero dispari; i fermioni sono tipicamente particelle «materiali».

FLOP Processo di trasformazione cui può essere soggetta la porzione Calabi-Yau dello spazio, la cui trama si strappa e si ricuce. Le conseguenze fisiche, tuttavia, sono modeste e del tutto accettabili nell'ambito della teoria delle stringhe.

FLUTTUAZIONE QUANTISTICA Comportamento turbolento di un sistema fisico a scale microscopiche, dovuto al principio di indeterminazione.

FOGLIO DI UNIVERSO *(WORLD-SHEET)* La superficie bidimensionale generata da una stringa durante il moto.

FORZA ELETTROMAGNETICA Una delle quattro forze fondamentali, che unificala forza elettrica e quella magnetica.

FORZA GRAVITAZIONALE La piú debole delle quattro forze fondamentali della natura; descritta dalla teoria della gravitazionale universale di Newton e, in seguito, dalla relatività generale di Einstein.

FORZA NUCLEARE DEBOLE *(O FORZA DEBOLE)* Una delle quattro forze fondamentali, nota soprattutto per il fatto di mediare processi di decadimento radioattivo.

FORZA NUCLEARE FORTE *(O FORZA FORTE)* La piú forte delle quattro forze fondamentali, che lega insieme i quark a formare protoni e neutroni e imprigiona questi ultimi all'interno dei nuclei atomici.

FOTONE La piú piccola frazione del campo elettromagnetico; la particella mediatrice della forza

elettromagnetica; il piú piccolo pacchetto di luce.

FREQUENZA Il numero di periodi che un'onda completa ogni secondo.

FUNZIONE D'ONDA Onde di probabilità sulle quali è fondata la meccanica quantistica; la funzione d'onda soddisfa *all'equazione di* Schrödinger.

GEOMETRIA QUANTICA Una modifica della geometria riemanniana, necessaria per descrivere con precisione la fisica dello spazio a scale ultramicroscopiche, quando gli effetti quantistici diventano rilevanti.

GEOMETRIA RIEMANNIANA Teoria matematica che studia spazi curvi di ogni dimensione. Svolge un ruolo cruciale nella descrizione dello spaziotempo in relatività generale.

GLUONE La piú piccola frazione del campo di forza forte; la particella mediatrice della forza forte.

GRAVITÀ QUANTISTICA Teoria che riesca a combinare meccanica quantistica e relatività generale, eventualmente modificando in modo opportuno l'una o l'altra teoria, o entrambe. La teoria delle stringhe è un esempio di teoria di gravità quantistica.

GRAVITONE La piú piccola frazione del campo gravitazionale; la particella mediatrice della forza gravitazionale.

INFLAZIONE Vedi modello cosmologico inflazionario.

INTEGRALE DI FEYNMAN Vedi Somma sui cammini.

LEGGI DEL MOTO DI NEWTON Leggi che descrivono il moto dei corpi, fondate sulla concezione che lo spazio e il tempo siano assoluti e immutabili. Tali leggi ebbero indiscussa autorità fino a quando Einstein non scoprì la relatività ristretta.

LISCIO *(SMOOTH)* Si dice di una regione dello spazio o dello spaziotempo che è piatta o dolcemente curva, priva di punte, pieghe spigolose, strappi di qualunque tipo; una regione priva di singolarità.

LUNGHEZZA D'ONDA La distanza tra due picchi (o due ventri) successivi di un'onda.

LUNGHEZZA DI PLANCK Pari a circa 10-33 centimetri. L'ordine di grandezza al di sotto del quale le fluttuazioni quantistiche nella trama dello spaziotempo diventano enormi; nella teoria delle stringhe, la dimensione tipica di una stringa.

MACROSCOPICO Termine che fa riferimento agli ordini di grandezza tipici del mondo a noi familiare o anche maggiori; piú o meno l'opposto di microscopico.

MASSA DI PLANCK Pari a circa dieci miliardi di miliardi la massa di un protone; circa un centesimo di milligrammo; circa la massa di un piccolo granello di polvere. Nella teoria delle stringhe, la massa equivalente di una stringa in vibrazione ha tipicamente questo ordine di grandezza.

MECCANICA QUANTISTICA Sistema di leggi fisiche che governano l'universo; le caratteristiche di questa teoria, che possono sembrare un po' bizzarre - quali il principio di *indeterminazione,* le *fluttuazioni quantistiche,* la *dualità onda-corpuscolo - si* manifestano soltanto alla scala microscopica degli *atomi* e delle particelle subnucleari.

METODO PERTURBATIVO Procedimento che si segue per semplificare un problema difficile, calcolando una soluzione approssimata, che è possibile rendere sempre piú precisa a mano a mano che si considerano, in modo sistematico, dettagli precedentemente trascurati.

MODELLO COSMOLOGICO INFLAZIONARIO Modello della primissima fase del *big bang,* durante la quale l'universo avrebbe subito un'espansione estremamente rapida e violenta.

MODELLO COSMOLOGICO STANDARD La teoria del *big bang* congiunta al *modello standard* della fisica delle particelle.

MODELLO STANDARD DELLA FISICA DELLE PARTICELLE *(MODELLO STANDARD)* Teoria di immenso successo sperimentale che descrive le tre forze non gravitazionali e la loro azione sulla materia. E' il risultato dell'unificazione della *cromodinamica quantistica* e della *teoria elettrodebole.*

MODELLO STANDARD SUPERSIMMETRICO
Generalizzazione del *modello standard* che tiene conto della supersimmetria. Fra le sue implicazioni, c'è il fatto che ogni particella elementare nota debba avere un *partner supersimmetrico.*

MODO DI AVVOLGIMENTO *(WINDING MODE)* La configurazione di una *stringa* che si avvolge attorno a una *dimensione* circolare dello spazio.

MODO DI STRINGA *(STRING MODE)* Una delle possibili configurazioni *(modo di vibrazione, modo di avvolgimento)* che può assumere una *stringa.*

MODO DI VIBRAZIONE *(VIBRATIONAL MODE)* Il numero preciso di picchi e ventri, e le rispettive ampiezze, che si osservano nell'oscillazione di una *stringa.*

M-TEORIA *(M-THEORY)* Teoria, frutto della *seconda rivoluzione delle superstringhe,* che unifica le precedenti cinque teorie delle stringhe in un solo quadro concettuale onnicomprensivo. L'M-teoria sembra prevedere uno spaziotempo a undici dimensioni; molti suoi aspetti rimangono tuttavia oscuri.

MULTIVERSO *(MULTIVERSE)* Ipotetico ampliamento del cosmo, costituito da un numero enorme di universi distinti e separati, uno dei quali sarebbe il nostro universo.

NEUTRINO Particella elettricamente neutra, soggetta soltanto alla *forza debole.*

NEUTRONE Particella priva di carica, costituita da tre *quark* (due quark down e un quark up); nell'atomo i neutroni fanno parte del *nucleo.*

NON PERTURBATIVO Caratteristica «esatta» di una teoria, la cui validità, cioè, è indipendente da calcoli approssimati eseguiti secondo il *metodo perturbativo.*

NUCLEO La parte centrale di un atomo, costituita da *protoni* e *neutroni.*

NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE Produzione di nuclei atomici che ha luogo durante i primi tre minuti del *big bang.*

NUMERO DI AVVOLGIMENTO *(WINDING NUMBER)* Il numero di volte che una *stringa si* avvolge attorno a una

dimensione circolare dello spazio.

NUMERO DI VIBRAZIONE *(VIBRATION NUMBER)* Numero intero che esprime l'energia di una *stringa* soggetta *a vibrazione uniforme* (l'energia, cioè, associata al moto della stringa, in contrapposizione a quella associata a cambiamenti di forma della *stringa).*

ONDE ELETTROMAGNETICHE Perturbazioni di tipo ondulatorio del *campo elettromagnetico,* che si propagano tutte alla velocità della luce. La luce visibile, i raggi X, le microonde e la radiazione infrarossa sono esempi di onde elettromagnetiche.

ORIZZONTE DEGLI EVENTI La superficie a «senso unico» di un *buco nero;* dopo averla oltrepassata, le leggi della gravità stabiliscono che è impossibile tornare indietro, impossibile sfuggire alla potente morsa gravitazionale del buco nero.

OROLOGIO A LUCE *(LIGHT CLOCK)* Ipotetico orologio che misura il tempo trascorso contando il numero dei viaggi di andata e ritorno compiuti da un singolo *fotone* tra due specchi posti l'uno di fronte all'altro.

OSSERVATORE Persona o parte di un apparato sperimentale, idealizzata e spesso ipotetica, che misura opportune proprietà di un sistema fisico.

PARTICELLA MEDIATRICE *(MESSENGER PARTICLE)* La piú piccola frazione di un *campo di forza;* ciò che, a livello microscopico, media la trasmissione di una forza.

PARTICELLE VIRTUALI Particelle che si sprigionano dal vuoto e hanno vita brevissima; in accordo al principio di indeterminazione, esse esistono in virtù di energia presa in prestito, che restituiscono quando si annichilano.

PARTNER SUPERSIMMETRICI Coppia di particelle associate l'una all'altra per supersimmetria; hanno perciò *spin* che differiscono di 1/2.

PIATTO Soggetto alle leggi della geometria codificate da Euclide; è piatto, ad esempio, uno spazio simile alla superficie di una tavola perfettamente liscia, o alle sue generalizzazioni in dimensioni superiori.

PRINCIPIO ANTROPICO Secondo tale principio, una spiegazione del perché l'universo ha le proprietà che osserviamo sta nel fatto che, qualora queste proprietà fossero differenti, è probabile che la vita non sarebbe emersa e, di conseguenza, noi esseri umani non saremmo qui a osservare tali differenze.

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA Principio cardine della *relatività generale,* secondo il quale è impossibile distinguere un moto accelerato dal moto dovuto alla presenza di un campo gravitazionale (purché l'osservazione si limiti a regioni abbastanza ristrette dello spaziotempo). Costituisce una generalizzazione del *principio di relatività,* in quanto dimostra che tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, possono asserire di essere in quiete, a condizione che riconoscano la presenza di un opportuno campo gravitazionale.

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE Principio della *meccanica quantistica,* scoperto da Heisenberg, in base al quale esistono proprietà dell'universo, come ad esempio la posizione e la velocità di una particella, che non si possono determinare con precisione assoluta. Questi aspetti di indeterminazione del mondo microscopico diventano tanto piú accentuati quanto minori sono gli ordini di grandezza spaziale e temporale ai quali li si considera. Le particelle e i campi oscillano e saltano tra tutti i possibili valori

consentiti dalla relazione di indeterminazione. Ciò dimostra che il mondo microscopico è tutto un frenetico vorticare, nel mare impetuoso delle *fluttuazioni quantistiche.*

PRINCIPIO DI RELATIVITÀ Principio cardine della *relatività ristretta,* secondo il quale tutti gli osservatori che si muovono a velocità costante gli uni rispetto agli altri sono soggetti alle stesse leggi fisiche; di conseguenza, ogni osservatore che si muove a velocità costante può legittimamente asserire di essere in quiete. Una generalizzazione di questo principio è costituita dal *principio di equivalenza.*

PROBLEMA DELL'ORIZZONTE Rompicapo cosmologico legato al fatto che regioni dell'universo pur separate da distanze enormi hanno proprietà fisiche quasi identiche ad esempio, temperatura quasi identica. Il *modello cosmologico inflazionario* offre una soluzione.

PROCESSO A UN LOOP *(ONE-LOOP PROCESS)* In un calcolo eseguito secondo il *metodo perturbativo il* contributo di una coppia stringa/antistringa (o di una coppia di particelle virtuali nel caso di una teoria di particellare).

PROTONE Particella di carica elettrica positiva, costituita da tre *quark* (due quark up e un quark down); nell'atomo i protoni fanno parte del *nucleo.*

QUANTI Le piú piccole unità in cui ogni oggetto fisico possa essere frazionato, in accordo alle leggi della meccanica quantistica. I fotoni, per esempio, sono i quanti del campo *elettromagnetico.*

QUARK Particella su cui agisce la *forza forte. I* quark si classificano in sei varietà - up (su), down (giú), charm (incanto), strange (strano), top (alto) e bottom (basso) - e possono avere tre «colori» (rosso, verde, blu).

QCD Vedi *cromodinamica quantistica.*

QED Vedi *elettrodinamica quantistica.*

RADIAZIONE COSMICA DI FONDO La radiazione a microonde che pervade l'intero universo, prodotta durante il *big bang* e divenuta piú fredda e meno intensa nel corso della successiva espansione.

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA L'energia trasportata da *un'onda elettromagnetica.*

RELATIVITÀ GENERALE La teoria della gravità formulata da Einstein, secondo la quale lo spazio e il tempo trasmettono la forza gravitazionale attraverso la *curvatura* del*lo spaziotempo.*

RELATIVITÀ RISTRETTA *(O SPECIALE)* La teoria di Einstein dello spazio e del tempo in assenza di gravità (vedi anche *relatività generale).*

RITARDO DEGLI OROLOGI Vedi dilatazione del tempo.

ROTTURA DI SIMMETRIA Riduzione del grado di simmetria di un sistema fisico, generalmente associata a una transizione di fase.

SCHIUMA QUANTISTICA *(QUANTUM FOAM)* In base alla concezione corpuscolare standard, la trama dello spaziotempo, a scale ultramicroscopiche, ha la caratteristica di apparire spumosa, aggrovigliata, quasi in effervescenza. E' questa una ragione essenziale dell'incompatibilità tra meccanica quantistica e relatività generale che sussisteva prima dell'avvento della teoria delle stringhe.

SECONDA RIVOLUZIONE DELLE SUPERSTRINGHE Nello sviluppo della teoria delle stringhe, il periodo iniziato intorno al 1995, quando i fisici cominciarono a comprendere alcuni aspetti non *perturbativi della* teoria.

SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA Legge fisica che asserisce che l'entropia totale di un sistema isolato aumenta sempre.

SFERA La superficie esterna di una palla. La superficie di un'usuale palla tridimensionale ha due dimensioni (che possono essere identificate con due numeri quali «latitudine» e «longitudine», come si fa per individuare un punto sulla superficie terrestre). Piú in generale, il concetto di sfera, tuttavia, cosí come quello di palla, si può definire in ogni dimensione. « Sfera unidimensionale» non è altro che un nome altisonante per indicare una circonferenza; una sfera di dimensione zero è una coppia di punti (come spiegato nel capitolo XIII). Una sfera tridimensionale è piú difficile da visualizzare: è la superficie di una palla quadridimensionale.

SFERA CON MANICI Superficie la cui topologia è equivalente a quella di una ciambella con un numero di buchi uguale a quello dei manici. Una sfera con un manico è un toro.

SIMMETRIA Proprietà di un sistema fisico che non cambia se il sistema subisce determinate trasformazioni. Per esempio, una sfera ha una simmetria rotazionale, nel senso che non appare diversa se sottoposta a una qualsiasi rotazione.

SIMMETRIA DI GAUGE Principio di simmetria che sta alla base della descrizione quantistica delle tre forze non gravitazionali. La simmetria riguarda l'invarianza di un sistema fisico rispetto a trasformazioni delle cariche di gauge, trasformazioni che possono variare in dipendenza del posto e del tempo.

SIMMETRIA *(DI GAUGE)* DELLA FORZA FORTE La simmetria di gauge associata alla forza forte, relativa all'invarianza di un sistema fisico rispetto alle trasformazioni di colore dei *quark.*

SIMMETRIA DI GAUGE ELETTROMAGNETICA La simmetria di gauge associata *all'elettrodi*namica quantistica.

SIMMETRIA SPECULARE *(MIRROR SYMMETRY)* Nel contesto della teoria *delle* stringhe, una simmetria secondo la quale due differenti spazi *di* Calabi-Yau, se scelti per descrivere le dimensioni compattificate della teoria di stringa, danno origine a identiche previsioni fisiche.

SINGOLARITÀ Luogo in cui la trama dello spazio o dello spaziotempo subisce una grave degenerazione e non è piú liscia.

SOLUZIONE DI SCHWARZSCHILD Soluzione delle equazioni di Einstein della relatività generale nel caso di una distribuzione sferica di materia; la possibile esistenza dei buchi neri è diretta conseguenza di tale

soluzione.

SOMMA SUI CAMMINI *(O INTEGRALE DI FEYNMAN)* Procedimento di calcolo in meccanica quantistica, inventato da Feynman, che si fonda sull'idea che le particelle viaggino da un punto all'altro muovendosi lungo tutti i cammini possibili che li congiungono.

SPAZIO *(O VARIETÀ)* DI CALABI-YAU *(CALABI-YAU MANIFOLD)* Spazio geometrico, in cui si possono compattificare le dimensioni spaziali extra previste dalla teoria delle stringhe, in accordo con le equazioni della teoria.

SPAZIOTEMPO Originariamente definito nell'ambito della relatività ristretta come unione di spazio e tempo. Si può immaginare come la «stoffa» con la quale è confezionato l'universo; costituisce lo scenario dinamico in cui hanno luogo gli eventi dell'universo.

SPIN E' l'analogo quantistico della rotazione di una trottola; tutte le particelle sono dotate di uno spin intrinseco, che non può mai cambiare ed è uguale o a un numero intero o alla metà di un intero dispari (adottando come unità di misura la costante *di* Planck).

STATI BPS In una teoria supersimmetrica, configurazioni le cui proprietà si possono determinare con esattezza attraverso argomentazioni fondate sulla simmetria.

STRINGA Oggetto fisico fondamentale avente dimensione uno, che costituisce l'elemento essenziale della teoria delle stringhe.

STRINGA APERTA Tipo di stringa che ha i due estremi liberi.

STRINGA CHIUSA Tipo di *stringa* che ha la forma di un cappio chiuso, di un anello deformabile.

SUPERGRAVITÀ Classe di teorie (non di stringa) che fondono la *relatività generale* e la *supersimmetria.* Le cosiddette teorie della supergravità in dimensioni superiori prevedono che lo *spaziotempo* abbia piú di quattro dimensioni.

SUPERGRAVITÀ IN UNDICI DIMENSIONI Una promettente teoria della *supergravità* in dimensioni superiori sviluppata negli anni settanta e successivamente ignorata; solo di recente si è dimostrato che essa costituisce una parte importante della *teoria delle stringhe.*

SUPERPARTNER Vedi *partner supersimmetrici.*

SUPERSIMMETRIA Principio di *simmetria* che stabilisce una relazione fra le proprietà di particelle aventi *spin* intero *(bosoni)* con quelle di particelle aventi spin uguale alla metà di un intero dispari *(fermioni).*

TACHIONE Particella la cui massa (al quadrato) è negativa; la presenza di tachioni in una teoria è generalmente fonte di contraddizioni logiche.

TEMPO DI PLANCK Pari a circa 10^{-43} secondi. Trascorso questo tempo dopo il *big bang* le dimensioni dell'universo erano dello stesso ordine di grandezza della *lunghezza di Planck;* piú precisamente, si definisce cosí il tempo che la luce impiega a percorrere la *lunghezza di Planck.*

TENSIONE DI PLANCK Pari a circa 1039 tonnellate. Nella teoria delle stringhe è questa la tensione tipica di una

stringa.

TEORIA DEBOLMENTE ACCOPPIATA *(WEAKLY COUPLED THEORY)* Teoria la cui *costante di accoppiamento di stringa* è minore di uno.

TEORIA DELLA GRAVITAZIONE UNIVERSALE DI NEWTON Teoria della gravità secondo cui la forza di attrazione tra due corpi è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. E' stata soppiantata dalla *relatività generale* di Einstein.

TEORIA DELLE STRINGHE *(STRING THEORY)* Teoria unificata dell'universo che ipotizza che i costituenti fondamentali della natura non siano particelle puntiformi zero-dimensionali, bensì minuscole cordicelle unidimensionali, dette *stringhe.* La teoria delle stringhe riesce a fondere in un armonioso quadro concettuale le due teorie fisiche precedentemente note del «piccolo» e del «grande» - la *meccanica quantistica* e la *relatività generale* - non altrimenti conciliabili. Spesso si usa come accorciamento di *teoria delle superstringhe.*

TEORIA DELLE SUPERSTRINGHE *Teoria, delle stringhe* che include la *supersimmetria.*

TEORIE DI GRANDE UNIFICAZIONE Classe di teorie che fondono le tre forze non gravitazionali in unico schema concettuale.

TEORIE DI KALUZA-KLEIN Classe di teorie che, nel quadro della *meccanica quantistica,* richiedono l'esistenza di *dimensioni compattificate* in aggiunta alle quattro dimensioni dello *spaziotempo.*

TEORIA DI STRINGA BOSONICA La prima teoria delle stringhe; i suoi *modi di vibrazione* sono tutti *bosoni.*

TEORIA DI STRINGA DI TIPO I Una delle cinque *teorie delle superstringhe;* prevede l'esistenza sia di *stringhe aperte* sia di *stringhe chiuse.*

TEORIA DI STRINGA DI TIPO IIA Una delle cinque *teorie delle superstringhe;* studia stringhe chiuse i cui modi vibrazionali destrorsi e sinistrorsi siano simmetrici.

TEORIA DI STRINGA DI TIPO IIB Una delle cinque *teorie delle superstringhe;* studia stringhe chiuse i cui modi vibrazionali destrorsi e sinistrorsi siano asimmetrici.

TEORIA DI STRINGA ETEROTICA E8 x E8 *(ETEROTICA-E) (HETEROTIC-E STRING THEORY)* Una delle cinque *teorie delle superstringhe;* descrive *stringhe chiuse,* le cui vibrazioni antiorarie assomigliano a quelle delle *stringhe di tipo II,* mentre quelle orarie sono simili alle vibrazioni delle *stringhe bosoniche.* Questa teoria differisce in maniera sottile ma importante dalla *teoria di stringa eterotica O(32).*

TEORIA DI STRINGA ETEROTICA O(32) *(ETEROTICA-O) (HETEROTIC-O STRING THEORY)* Una delle cinque *teorie delle superstringhe;* descrive *stringhe chiuse,* le cui vibrazioni antiorarie assomigliano a quelle delle *stringhe di tipo II,* mentre quelle orarie sono simili alle vibrazioni delle *stringhe bosoniche.* Questa teoria differisce in maniera sottile ma importante dalla *teoria di stringa eterotica E8 x E8*

TEORIA ELETTRODEBOLE *Teoria di campo quantistica* che descrive in un quadro unificato sia la forza *debole* sia la forza *elettromagnetica.*

TEORIA ELETTROMAGNETICA DI MAXWELL *(O TEORIA DI MAXWELL)* Teoria, elaborata da Maxwell nella

seconda metà dell'Ottocento, che unifica elettricità e magnetismo ed è fondata sul concetto di campo *elettromagnetico;* in accordo a tale teoria, la luce visibile è un esempio di *onda elettromagnetica.*

TEORIA FORTEMENTE ACCOPPIATA *(STRONGLY COUPLED THEORY)* Teoria la cui *costante di accoppiamento di stringa è* maggiore di uno.

TEORIA QUANTISTICA DI CAMPO *(QUANTUM FIELD THEORY)* Una teoria quantistica dei campi - ad esempio del *campo elettromagnetico - che* incorpori anche la *relatività ristretta.* Propriamente, « teoria di campo quantistica relativistica».

TEORIA UNIFICATA Ogni teoria che descriva tutte le quattro forze fondamentali e tutta la materia nell'ambito di un unico quadro concettuale onnicomprensivo.

TERMODINAMICA Insieme di leggi fisiche formulate nel XIX secolo che descrivono le proprietà di grandezze quali il calore, il lavoro, l'entropia e le loro trasformazioni in un sistema fisico.

TOE *(THEORY OF EVERYTHING, «TEORIA DEL TUTTO»)* Teoria quantistica che riesca a unificare tutte le forze e tutte le particelle.

TOPOLOGIA Branca della matematica che classifica gli spazi in gruppi distinti, a seconda che si possano o meno deformare l'uno nell'altro senza operare lacerazioni o strappi di alcun genere.

TORO La superficie di una ciambella.

TRANSIZIONE ATTRAVERSO SINGOLARITÀ CONICHE *(CONIFOLD TRANSITION)* Processo di evoluzione cui è soggetta la porzione *Calabi-Yau* dello spazio, la cui trama si strappa e si ricuce. Le conseguenze fisiche, tuttavia, sono modeste e del tutto accettabili nell'ambito della teoria delle stringhe. Gli strappi che caratterizzano questa transizione sono piú gravi di quelli che sí producono in un flop.

TRANSIZIONE DI FASE Processo di evoluzione dì un sistema fisico da una fase a un'altra.

TRANSIZIONE TOPOLOGICA Processo di evoluzione della struttura di uno spazio che comporta lacerazioni o strappi e che, di conseguenza, cambia la sua *topologia.*

ULTRAMICROSCOPICO Termine che si riferisce a lunghezze piú corte della *lunghezza di Planck (o* anche a tempi piú brevi del tempo *di Planck).*

VIBRAZIONE UNIFORME Il moto complessivo di una *stringa* quando questa sì muove senza modificare la propria forma.

ZERO ASSOLUTO La piú bassa temperatura possibile, pari a circa -273 gradi Celsius (è lo zero sulla scala Kelvin).